

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**LEONARDO VASCONCELOS OJEDA**

**APROVEITAMENTO DA CASCA DE ARROZ PRODUZIDA NO ESTADO DO  
RIO GRANDE DO SUL EM USINAS TERMELÉTRICAS**

**Bagé**

**2023**

**LEONARDO VASCONCELOS OJEDA**

**APROVEITAMENTO DA CASCA DE ARROZ PRODUZIDA NO ESTADO DO  
RIO GRANDE DO SUL EM USINAS TERMELÉTRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientadora: Sabrina Neves da Silva

**Bagé  
2023**





SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal do Pampa

**LEONARDO VASCONCELOS OJEDA**

**APROVEITAMENTO DA CASCA DE ARROZ PRODUZIDA NO RIO GRANDE DO SUL EM USINAS  
TERMOELETRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para o Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 19 de janeiro de 2023.

Banca examinadora:

---

Prof. Dra. Sabrina Neves da Silva  
Orientadora  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Luciano Vieceli Taveira  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Marcelo Romero de Moraes  
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **SABRINA NEVES DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/01/2023, às 22:17, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARCELO ROMERO DE MORAES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/01/2023, às 16:49, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUCIANO VIECELI TAVEIRA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/01/2023, às 16:50, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1031932** e o código CRC **5F1139DB**.

Dedico este trabalho a minha família,  
amigos e colegas que me apoiaram  
incansavelmente na minha graduação.

## **AGRADECIMENTO**

Primeiramente agradeço ao pai celestial, que nunca me desamparou em nenhum momento, restabelecendo as minhas forças e me dando ânimo para continuar.

Agradeço à Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Sabrina Neves, que me auxiliou na realização deste, onde sempre esteve disposta a me orientar e sanar minhas dúvidas. Aos professores da graduação, que tenho imensa gratidão, sem vocês eu não teria vivenciado tantos ensinamentos que contribuíram na minha formação.

Meus agradecimentos a minha mãe, Nara e ao meu pai Acemar, que foram os grandes provedores na minha graduação, não deixando faltar nada, apoio, paciência e perseverança.

Agradeço a minha namorada Mariana, pois sempre me incentivou a buscar o melhor de mim, me mostrando que tudo é possível com dedicação.

## RESUMO

De acordo com o desenvolvimento da sociedade, o suprimento de energia seja elétrica, mecânica ou térmica, foi de suma importância, proporcionando mobilidade e conforto. No avançar da sociedade começamos a observar mudanças no meio ambiente, como a poluição atmosférica, que culmina em diversos fatos alarmantes, dentre eles, chuva ácida, efeito estufa, diminuição da camada de ozônio e mudanças climáticas. Atualmente, 67% dos gases do efeito estufa são provindos do uso de combustíveis fósseis e processos industriais. A descarbonização, é a ideia que consiste na redução da dependência dos combustíveis fósseis, sendo a favor do uso de combustíveis renováveis unida a transição energética, deixando de ser uma matriz energética baseada em hidrocarbonetos. A utilização de biocombustíveis em unidades termelétricas permite a conclusão do ciclo do carbono, menor poluição relacionada aos combustíveis fósseis. A casca de arroz é um substrato estéril, e subproduto resultante do processamento do grão de arroz, seu emprego em unidades de geração e cogeração de energia como combustível, possibilitam a geração de energia elétrica ou térmica, utilizando as em processos industriais, havendo como resultado da combustão, as cinzas da casca de arroz, que podem ser utilizadas como adubo ou mistura em argamassas cimentícias, ambas finalidades contribuintes para a minimização de impactos ambientais.

Palavras-Chave: Descarbonização; Casca de arroz; Cinzas da casca de arroz; Matriz energética; Transição energética

## RESUMEN

De acuerdo con el desarrollo de la sociedad, el suministro de energía, ya sea eléctrica, mecánica o térmica, fue de suma importancia, brindando movilidad y comodidad, alarmando, entre ellos, la lluvia ácida, el efecto invernadero, el agotamiento de la capa de ozono y el cambio climático. Actualmente el 67% de los gases de efecto invernadero provienen del uso de combustibles fósiles y procesos industriales, la descarbonización es la idea que consiste en reducir la dependencia de los combustibles fósiles, estar a favor del uso de combustibles renovables junto con la transición energética, dejar de ser una energía matriz a base de hidrocarburos. El uso de biocombustibles en unidades termoeléctricas permite completar el ciclo del carbono, menos contaminación relacionada con los combustibles fósiles. La cascarilla de arroz es un sustrato estéril, y un subproducto resultante del procesamiento del grano de arroz, su uso en unidades de generación y cogeneración de energía como combustible, posibilita la generación de energía eléctrica o térmica, utilizándolas en procesos industriales, resultando de combustión, cenizas de cascarilla de arroz, que pueden ser utilizadas como fertilizante o mezcla en morteros cementosos, contribuyendo ambas finalidades a la minimización de los impactos ambientales.

Palabras clave: Descarbonización; cáscara de arroz; Ceniza de cáscara de arroz; Matriz energética; transición energética



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Oferta interna de energia elétrica por fonte.....	24
Figura 2 - Emissão de CO <sub>2</sub> .....	25
Figura 3 - Índices de transição energética .....	29
Figura 4- Elementos do ciclo Rankine simples.....	33
Figura 5 - Elementos do ciclo Brayton simples.....	34
Figura 6 - Ciclo combinado.....	34
Figura 7- Motor de Combustão Interna .....	35
Figura 8 - Localização das unidades de cogeração .....	44
Figura 9 - Ciclo de Cogeração.....	48
Figura 10 - Caldeira aquatubular.....	49
Figura 11 - Produção de casca .....	52
Figura 12 - Caldeira.....	53
Figura 13 - Turbina.....	55
Figura 14 - Condensador .....	56
Figura 15 - Torre de resfriamento.....	57
Figura 16 - Moega .....	58
Figura 17 - Silo de armazenamento .....	59
Figura 18 - Caixa de cinzas.....	60
Figura 19 - Micrografia da CCA.....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados referentes a safra de arroz.....	51
Tabela 2 - Dados de fabricação retirados do manual.....	53
Tabela 3 - Dados nominais turbina.....	55
Tabela 4 - Dados nominais condensador.....	57
Tabela 5 - Dados nominais torre de resfriamento .....	58

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 — Pesquisas correlatas.....	38
--------------------------------------	----

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANNEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CA – Casca de arroz

CCA – Cinzas da Casca de arroz

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

COP 21 – Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2021

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

GEE – Gases de efeito estufa

GW – Gigawatt

IEMA – Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos

MME – Ministério de Minas e Energia

MMGD – Micro e Minigeração Distribuída

PIB – Produto Interno Bruto

RS – Rio Grande do Sul

TEP – Tonelada Equivalente de Petróleo

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>18</b>
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1 Recursos energéticos.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1.1 Petróleo .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.2 Gás Natural .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.3 Urânio .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.4 Água .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1.5 Carvão Mineral.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1.6 Biomassa .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1.7 Vento .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.8 Sol.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.9 Oceanos .....</b>	<b>23</b>
<b>2.2 Matriz energética brasileira .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3 Transição energética.....</b>	<b>24</b>
<b>2.3.1 Perspectivas para o fim da era do petróleo .....</b>	<b>26</b>

<b>2.3.2 Aspectos ambientais.....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.3 Desafios da transição energética no Brasil .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.4 Países que já avançaram na transição da matriz energética .....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.5 Impacto econômico.....</b>	<b>29</b>
<b>2.3.6 Políticas públicas e normativas para a transição energética.....</b>	<b>30</b>
<b>2.4 Geração termelétrica.....</b>	<b>32</b>
<b>2.4.1 Ciclos termodinâmicos .....</b>	<b>32</b>
<b>2.4.1.1 Ciclo Rankine.....</b>	<b>32</b>
<b>2.4.1.2 Ciclo Brayton .....</b>	<b>33</b>
<b>2.4.1.3 Ciclo combinado.....</b>	<b>34</b>
<b>2.4.1.4 Motores à combustão .....</b>	<b>35</b>
<b>2.5 Combustíveis mais utilizados na geração termoelétrica .....</b>	<b>35</b>
<b>2.5.1 Carvão mineral .....</b>	<b>36</b>
<b>2.5.2 Gás Natural .....</b>	<b>36</b>
<b>2.5.3 Biomassa .....</b>	<b>37</b>
<b>2.5.3.1 Casca de arroz para geração termelétrica .....</b>	<b>37</b>
<b>2.5.3.2 Estado da arte.....</b>	<b>38</b>
<b>2.5.3.3 Cinza da casca de arroz.....</b>	<b>40</b>

<b>2.6 Princípios de Cogeração .....</b>	<b>40</b>
<b>2.6.1 Projeto de cogeração.....</b>	<b>41</b>
<b>2.6.2 Benefícios da cogeração .....</b>	<b>41</b>
<b>2.6.3 Participação da Cogeração nas Fontes de Energia Industrial .....</b>	<b>42</b>
<b>2.6.4 Unidades de cogeração no estado do Rio Grande do Sul.....</b>	<b>43</b>
<b>2.7 Importação de energia elétrica e energia de reserva .....</b>	<b>44</b>
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>46</b>
<b>3.1 Técnicas de caracterização das cinzas .....</b>	<b>47</b>
<b>3.2 Cogeração em beneficiadoras de arroz.....</b>	<b>48</b>
<b>4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>51</b>
<b>Caracterização das Cinzas .....</b>	<b>61</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>62</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>63</b>
<b>ANEXO A- ARTIGO COMPLETO.....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Entende-se como matriz energética, o conjunto de fontes disponíveis para suprir a demanda por energia. O desenvolvimento econômico e tecnológico contribui para o aumento da demanda energética, em especial da matriz elétrica. Contudo, os padrões atuais de recursos energéticos e de uso da energia se mostram prejudiciais para o bem-estar de longo prazo da humanidade. (Menegaki, 2014). O ser humano se desenvolve de forma instintiva procurando bem-estar e segurança, assim extraíndo recursos do meio ambiente para a conversão de energia. Vivemos em uma sociedade que depende de fontes de energia, a qual é indispensável para desenvolvimento na medida que se aumenta a produtividade do trabalho humano, fazendo que a sociedade tenha mais produtividade (Cintra, 2018).

A matriz energética do Brasil é muito diferente da mundial, pois utiliza mais fontes renováveis que o resto do mundo; conforme o balanço energético de 2022, as renováveis totalizam 44,8% da matriz energética brasileira. No cenário mundial, as renováveis correspondem a 14% (EPE, 2022).

A geração termoelétrica de energia consiste na combustão de um combustível, renovável ou não renovável, cujo calor gerado é útil para o aquecimento da água de uma caldeira, que se transforma em vapor, que gira uma turbina, transformando a energia térmica (calor) em energia cinética (movimento) e depois em energia elétrica. Em decorrência da combustão, ocorre a emissão de gases poluentes, os quais, no caso da queima de combustíveis de origem fóssil ou não renovável causam impacto ambiental pela elevada emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) (EPE, 2022).

Reduções das emissões GEE e da intensidade de carbono da economia têm sido mostrados como os principais objetivos associados a uma transição para uma economia de baixo carbono e emissão reduzida de GEE (PNE 2050, 2022).

A descarbonização da economia é um conceito associado aos setores energéticos. A transição energética, por sua natureza, abrange todos os esforços para a redução de intensidade de carbono, por meio de ter consciência que sua poluição local afeta a região e demais partes do planeta. A transição energética se dará ao longo do tempo, havendo inúmeras possibilidades de recursos energéticos, se adequando às necessidades regionais de infraestruturas de transporte e de mobilidade características das matrizes energéticas (PNE 2050, 2022).



De acordo com evolução humana, o aproveitamento energético da biomassa disponível foi essencial. Comumente florestas e uso de biomassa sólida progrediram juntos, do início quando a lenha era catada para cocção, usada na proteção e aquecimento, até atualmente que são envolvidas práticas de produção silvo-agropecuárias e industriais, de transformação e uso de biocombustíveis para geração de calor, força motriz e eletricidade (EPE, 2016).

A bioeletricidade no Brasil tem sua obtenção principal é através da cogeração em unidades do ramo industrial sucroenergético e, em menor escala, de papel e celulose (EPE, 2016).

No sul do país, dentre os resíduos agrícolas mais produzidos e que possuem aplicação para a geração de energia de eletricidade, destaca-se a casca de arroz.

A casca do arroz representa o maior volume entre os subprodutos obtidos durante o beneficiamento do cereal, chegando, em média, a 22%. Sua utilização é bastante variada, sendo a principal a produção de energia. As empresas beneficiadoras de arroz são as principais consumidoras da casca como combustível para a secagem e parboilização do cereal. Como propicia temperaturas de até 1000°C, é usada na alimentação de fornalhas de secadores e das autoclaves da própria indústria arroseira. A queima de casca de arroz para produção de energia é uma opção atrativa do ponto de vista econômico e tecnológico. Além do baixo impacto ambiental, todo o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) gerado durante a combustão retorna ao ciclo do carbono da biosfera terrestre (Silva, 2020).

Considerando-se que o RS registrou no período de 2018-2020 uma produção de 7.775.850 toneladas em média do grão (IBGE, 2020), gera-se um grande volume desse resíduo o qual pode ser aproveitado como recurso energético em substituição total ou parcial a combustíveis de origem fóssil, como o carvão mineral, para geração de energia em usinas termoeletricas visando contribuir para descarbonização da matriz energética brasileira

## **1.1 Objetivo Geral**

O principal objetivo deste trabalho é o uso da casca de arroz para geração e cogeração de energia visando a descarbonização da matriz energética.

## **1.2 Objetivos Específicos**

Realizar uma pesquisa exploratória e descritiva sobre recursos energéticos, matriz energética e transição energética.

Estimar, a partir do volume de casca de arroz produzido no Rio Grande do Sul, o potencial para geração e cogeração de energia.

Caracterizar as cinzas da casca de arroz, geradas na queima da casca, visando seu reaproveitamento.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura está dividida em tópicos, primeiro fala sobre recursos energéticos, a seguir discorre sobre a matriz energética brasileira, transição energética, geração termoelétrica e os combustíveis mais utilizados nessa forma de geração de energia, dando ênfase à casca de arroz, cogeração e finaliza falando sobre importação de energia elétrica e energia de reserva.

### 2.1 Recursos energéticos

Entende-se como recursos energéticos os recursos naturais que possam ser aproveitados para obter energia. Os recursos energéticos estão divididos em não renováveis e renováveis. Alguns exemplos são descritos a seguir.

Algumas formas de energia podem ser restabelecidas em períodos relativamente curtos ou seu uso pelos seres humanos não significa necessariamente esgotamento. O álcool da cana-de-açúcar, por exemplo, pode ser obtido continuamente em safras sucessivas se o solo for usado de forma racional e não se degradar. A geração hidráulica também pode ser considerada uma forma renovável de energia, pois sua utilização não significa o esgotamento da água ou de qualquer outro recurso. Outros exemplos de formas de energia que podem ser consideradas renováveis são a energia obtida a partir de células fotovoltaicas (energia solar), a energia eólica, a energia das marés ou ainda a energia obtida a partir de óleos vegetais. Essas formas de energia podem ser classificadas como renováveis porque suas fontes são ou podem ser constantemente renovadas, respeitando seu ciclo natural de recomposição da natureza. São, portanto, fontes de energia que devem compor a matriz energética do país em busca de um equilíbrio sustentável dos recursos energéticos (Barreto *et al.*, 2013).

Os combustíveis fósseis, como petróleo, gás natural e carvão mineral, são produzidos na natureza em condições muito específicas, por meio de processos naturais que duram milhares de anos. Ao ritmo de consumo atual, a utilização destes recursos energéticos irá, a dada altura, fazer com que se esgotem ou se tornem economicamente inviáveis devido ao aumento dos preços por causa da sua escassez. Assim, essas fontes de energia “tradicionais” podem ser classificadas como não renováveis, pois seu uso esgota a fonte de suprimento (Barreto *et al.*, 2013).

### **2.1.1 Petróleo**

Em 2017, as reservas comprovadas de petróleo atingiram 12,8 bilhões de barris, principalmente offshore. A relação Reserva/Produção para reservas provadas foi de 15 anos e para reservas totais foram de 27 anos (Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050, 2018).

Com a demanda existente de petróleo seu consumo percorrerá uma trajetória de crescimento significativo, estando atrelado às condicionantes do cenário macroeconômico. No entanto, espera-se que até 2030 haja superávit na produção e consumo de petróleo. A produção de petróleo em 2030 é estimada em 3,7 milhões de barris por dia, com aumento da capacidade de refino necessária para atender à demanda doméstica (Tolmasquim, 2007).

### **2.1.2 Gás Natural**

Até agora, a produção de gás natural do país tem sido majoritariamente associada ao petróleo, principalmente graças às jazidas offshore. No entanto, no horizonte de 2050, prevê-se a exploração de áreas mais propensas ao gás natural associado e bacias offshore não convencionais. De acordo com as estimativas do estudo, na hipótese de referência, a produção de fontes exclusivamente convencionais poderia chegar a 200 milhões de m<sup>3</sup>/dia em 2050, o que representa cerca de quatro vezes a produção atual. Quando possível a produção de gás não convencional, o Brasil poderá atingir uma produção diária de até 450 milhões de m<sup>3</sup>/dia em 2050 (Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050, 2018).

### **2.1.3 Urânio**

O urânio desponta como importante recurso na matriz energética mundial desde meados da década de 1960. Os primeiros estudos geológicos do urânio no Brasil foram realizados no final do século 19. A descoberta da caldazita relacionada ao urânio ocorreu na década de 40 do século passado no Brasil, as jazidas de urânio são encontradas principalmente na Bahia, Ceará, Paraná e Minas Gerais, o Brasil possui recursos significativos de urânio, ocupando uma posição de destaque a nível mundial. O recurso é de 244.788 toneladas de urânio contendo (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) (Lima, 2021).

#### **2.1.4 Água**

O potencial hidrelétrico brasileiro é de 260 GW, ocupando o 4º lugar no mundo depois da China, Rússia e Estados Unidos, os dois últimos países um pouco acima do Brasil. Destes, os estudos de planejamento consideram apenas 180 GW, tal como está em uso até 2030. Outros 80 GW, por questões ambientais, considerando a legislação existente uma dificuldade para implementação de novas usinas. Esses 80 GW estão localizados em áreas tradicionais, parques nacionais, reservas florestais e reservas de terras indígenas que não podem ser usados de acordo com as leis ambientais nacionais aplicáveis. Em algumas dessas áreas, nem mesmo é permitido realizar estudos de viabilidade de bacias hidrológicas e usinas hidrelétricas (Filho, 2012).

#### **2.1.5 Carvão Mineral**

O consumo interno nacional de carvão, embora pouco significativo (9,7 milhões de toneladas em 2014 para abastecer uma central com capacidade instalada de 3,2 GW), contrasta com as grandes reservas medidas de carvão mineral de 7,2 mil milhões de toneladas (13º no mundo). As reservas podem chegar a 10,1 bilhões de toneladas se mais investimentos forem feitos em pesquisa e exploração, segundo o Departamento Nacional de Pesquisas Minerais (DNPM). Em comparação, as reservas de carvão do país em termos de energia superam seis vezes as reservas disponíveis de gás natural e podem garantir a operação de até 46 usinas com potência uniforme de 500 MW por 25 anos (Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050, 2018).

#### **2.1.6 Biomassa**

Biomassa é uma fonte de energia renovável que utiliza meios orgânicos, como vegetais diversos, para a produção energética. Pode ser usada diretamente para geração de energia, por queima, por exemplo, ou então para originar biocombustíveis tais como o biodiesel e o bioetanol (Bellote, 2019).

Os recursos mundiais de biomassa são imensos e existem muitas tecnologias para produzir energia de forma lucrativa e não comercial. Espera-se uma maior

geração de energia a partir da biomassa em cenários futuros, atendendo as expectativas de que se torne mais competitiva em relação aos combustíveis fósseis (Gênova *et al.*, 2023).

### **2.1.7 Vento**

O Brasil possui um enorme potencial eólico tanto *onshore* quanto *offshore*. Em 2001, o Atlas de Potencial Eólico Brasileiro estimou um potencial de 143 GW em terra a 50 metros. O progresso tecnológico e as medições em altitudes mais elevadas realizadas para alguns estados brasileiros mostram que esse potencial é muito superior a 440 GW. O potencial costeiro a 10 km da costa soma 57 GW e no caso extremo considerando a zona econômica exclusiva (com uma distância de 200 milhas da costa) o potencial chega a 1.780 GW. Em relação à lâmina d'água, na faixa batimétrica de 0 a 20 m o potencial é de 176 GW, de 20 a 50 m o potencial é de 223 GW e de 50 a 100 m o potencial é de 606 GW (POTENCIAL DOS RECURSOS ENERGÉTICOS NO HORIZONTE 2050, 2018).

### **2.1.8 Sol**

No final de abril de 2021, a capacidade instalada de energia solar fotovoltaica no Brasil era equivalente a 8,9 GW, dos quais 3,3 GW são projetos centralizados e 5,6 GW são geração distribuída. O Nordeste abriga 70,7% dos projetos solares fotovoltaicos centralizados, enquanto 18,9% são fotovoltaicos distribuídos no país. Nessa região, Piauí (31,3%) e Bahia (23,7%) se destacam pela energia solar centralizada, enquanto Ceará (3,6%) e Bahia (3%) se destacam pela mini e microgeração distribuída (MMGD).

O Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica 2030 (MME; EPE, 2021) mostra um futuro promissor para a energia solar no Brasil. Segundo o estudo, a geração solar fotovoltaica terá o maior crescimento entre as fontes de energia. Para fontes solares concentradas, o estudo mostra crescimento de 163% a 2021-2030, atingindo produção de 21 TWh (2,3% do total) dentro do planejado. A geração distribuída deverá atingir entre 16,8 GW e 2,5 GW de capacidade instalada em 2030, dependendo das regras adotadas nas alterações do quadro legal do MMGD e

alterações no modelo tarifário de baixa tensão. Estão previstos investimentos de R\$50-70 bilhões neste segmento (Bezerra, 2021).

Em 2030, estima-se que as fontes solares (centralizadas, autoprodução, MMGD) gerem 53 TWh, o equivalente a 5,8% da geração de eletricidade do país. O Nordeste será a região mais considerada para investimentos planejados em energia solar devido à sua alta competitividade nessa atividade (Bezerra, 2021).

### **2.1.9 Oceanos**

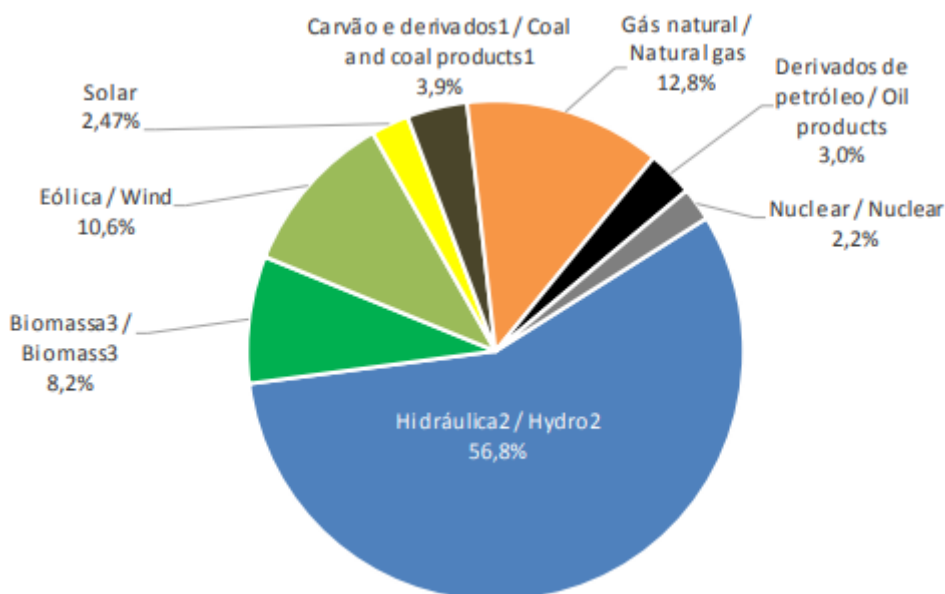
Embora a tecnologia para esta energia seja recente e ainda esteja em processo de exploração comercial, a utilização dos recursos marinhos é promissora devido à abundância deste recurso em todo o mundo. A energia oceânica está disponível através de ondas, marés, correntes oceânicas, gradientes de temperatura e gradientes de salinidade, mas o atual estágio de desenvolvimento tecnológico só nos permitiu avaliar o potencial dos dois primeiros. Em princípio, a estimativa foi baseada na extensão da linha de costa de cada estado da federação e na altura média das ondas em um ano, resultando em uma estimativa de 114 GW do potencial total de ondas e marés do Brasil (Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050, 2018).

## **2.2 Matriz energética brasileira**

O Brasil possui uma matriz elétrica majoritariamente renovável com foco na fonte hídrica, que responde por 53% da oferta interna. Considerando que quase todas as importações são provenientes da Usina de Itaipu, a fonte hídrica é de cerca de 57%. As fontes renováveis de energia respondem por 78,1% da produção interna de eletricidade no Brasil, que resulta principalmente da soma da produção doméstica renovável e dos volumes de importação (BEN, 2022).

A Figura 1 mostra a oferta interna de energia elétrica por fonte conforme o Balanço energético Nacional de 2022. Conforme a Figura 1, nota-se que a maior parte da nossa matriz energética é composta por hidráulica 56,8%, e em segundo lugar Gás Natural com 12,8% na terceira posição Eólica com 10,6%.

Figura 1- Oferta interna de energia elétrica por fonte.



Fonte: BEN (2022)

### 2.3 Transição energética

Mundialmente, as preocupações com o clima reforçaram uma série de reflexões e iniciativas em direção a uma transição energética, a qual consiste na transformação da matriz energética. Para que ocorra essa transição, os países estão focados em diminuir a participação de fontes fósseis em suas matrizes, bem como promover ações para aumentar a eficiência energética, o armazenamento de energia e o estímulo a fontes que não emitem GEE na sua operação. A compensação florestal é uma das tecnologias adotadas para remoção de carbono emitido à atmosfera. Nesse sentido, a tendência é de que o mundo diminua o uso de fontes não renováveis, especialmente o carvão, o óleo combustível e o óleo diesel na geração de eletricidade e aumente o uso das fontes renováveis e não emissoras, como eólica, solar, bioenergia (biocombustíveis líquidos e termelétricas à biomassa e resíduos), hidráulica e nuclear (EPE, 2022).

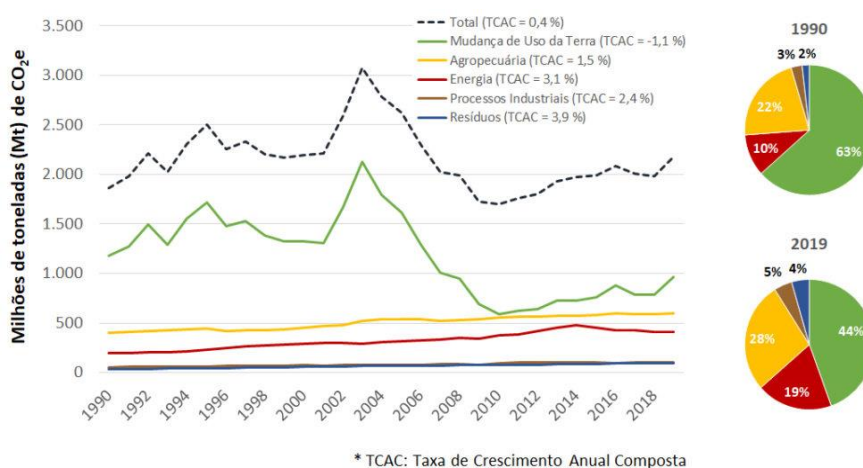
A transição energética implicará também mudanças profundas na base tecnológica, nos hábitos de consumo e nas relações socioeconômicas e ambientais através da redução e reciclagem de resíduos. A transição energética também traz



mudanças importantes na geopolítica energética global, que apresentam desafios e oportunidades para diferentes países do mundo. A atual transição energética é caracterizada por emissões de dióxido de carbono, descentralização e digitalização. A descarbonização se concentra nas emissões de dióxido de carbono, a descentralização na produção de energia próxima ao consumidor e a digitalização significa a transformação digital de documentos, operações e serviços (EPE, 2022).

No Brasil, o setor de energia não é o principal responsável pelas emissões de GEE, segundo o instituto de energia e meio ambiente (IEMA) em 2019 o Brasil emitiu 2,2 bilhões de toneladas de gases de efeito estufa (GEE); o que contribuiu com a maior parcela foi as atividades de agricultura correspondentes aos setores de Mudança de Uso da Terra e de Agropecuária – representaram 72% das emissões brasileiras, os segmentos de setor de energia 19% e indústria 5%. A Figura 2 mostra graficamente as emissões de CO<sub>2</sub> para diferentes setores.

Figura 2- Emissão de CO<sub>2</sub>



Fonte: Instituto de Energia e Meio Ambiente (2019)

Além disso, a matriz brasileira, principalmente a matriz elétrica, possui uma parcela maior de energias renováveis e livres de carbono do que as matrizes mundiais. Para manter um alto nível de energia renovável na matriz elétrica brasileira, a participação das energias eólica e solar na produção de energia elétrica do país foi aumentada. Devido à variabilidade na disponibilidade de energia eólica e solar, a

eletricidade produzida por essas fontes também varia. Portanto, fica claro que as usinas termelétricas ainda são importantes para a estabilidade do sistema elétrico, pois podem ser acionadas mais rapidamente. Nesse contexto, o gás natural, que, apesar de ser um combustível fóssil e a biomassa são alternativas promissoras para queima em termoeletricas, pois emitem menos GEE do que a queima de petróleo e carvão. Além disso, tem-se o biometano e hidrogênio que podem substituir o gás natural criando uma trajetória de sustentabilidade gradual ao longo do tempo (EPE, 2022).

Um dos nossos maiores desafios está no setor de transportes, que utiliza principalmente combustíveis fósseis. Para reduzir as emissões de gases de efeito estufa desse setor no Brasil, uma das iniciativas é incentivar o uso de biocombustíveis. Também cobrimos carros elétricos, como ônibus elétricos, que não geram gases de efeito estufa quando operam. Também está sendo desenvolvido o programa “Combustível do Futuro”, que oferece medidas para aumentar o uso de combustíveis sustentáveis e de baixo carbono. Além disso, a eficiência energética foi a que mais progrediu nos últimos anos nos setores que mais consomem energia: transporte e indústria (EPE, 2022).

### **2.3.1 Perspectivas para o fim da era do petróleo**

Nos últimos cem anos, o petróleo se consolidou como a principal fonte de energia e o recurso estratégico mais importante do mundo moderno. Sua trajetória tumultuada, intimamente ligada a episódios-chave de nossa história recente, é marcada por intensas disputas de domínio e alternância de períodos de escassez e prosperidade (Santos, 2019). Segundo Pimentel (2011), há dois cenários de crise para o fim da era do petróleo, primeiro:

Cenário A: um pouso forçado. Examinará as consequências de uma aposta mundial equivocada na manutenção do atual paradigma energético. Por um erro de diagnóstico ou falta de vontade política para tomar decisões que se afiguram difíceis e muitas vezes impopulares, os sinais da aproximação de uma crise energética de grandes dimensões seriam essencialmente ignorados até a constatação concreta do PO. Neste cenário, investimentos em pesquisa, desenvolvimento e incorporação de novas tecnologias (em matéria de energia e eficiência) mantêm-se nos patamares atuais, ou até mesmo retraem-se, na esteira da crise financeira de 2008 [...]

Cenário B: transição induzida. Assume uma tempestiva tomada de consciência dos riscos associados ao Peak oil e a adoção acelerada de

programas de adaptação que contemplam fortes investimentos em fontes tradicionais e alternativas de energia. A viabilização em escala global de novas fontes de energia, associada a redobrados esforços para a produção de petróleo e gás natural, possibilitará, neste cenário, uma compensação progressiva dos piores efeitos do peak oil a partir de 2018 e, eventualmente, a estabilização da equação energética mundial com base em um novo paradigma até 2030 [...] (Pimentel, 2011, p. 101-102)

### **2.3.2 Aspectos ambientais**

Como uma das oito maiores economias do mundo e possuindo um grande potencial em fontes de energia renováveis, recursos florestais e biodiversidade, o Brasil teve um papel importante na Conferência das Partes COP 21, inclusive sendo um dos líderes na comunicação entre países em desenvolvimento, uma solução global comum. Além da ação autônoma, o país atuou diplomaticamente por meio da coalizão BASIC Brasil, África do Sul, Índia e China e do G77, grupo de países em desenvolvimento (COP 21, 2015).

A proposta do Brasil foi de reduzir as emissões de GEE em 37% até 2025 e 3% antes de 2030. Para isso, o país planeja acabar com a extração ilegal de madeira até 2030, reflorestar 12 milhões de hectares de floresta, restaurar 15 milhões de hectares de pastagens degradadas e promover a integração de lavouras, pecuária e florestas. O Brasil também deve garantir que até 2030, 45% de sua matriz energética seja proveniente de fontes renováveis (COP 21, 2015).

### **2.3.3 Desafios da transição energética no Brasil**

Diversos são os desafios enfrentados pelo setor elétrico brasileiro, bem como pela sua matriz energética como um todo. Atualmente, um dos grandes obstáculos é encontrar um ponto de equilíbrio entre a expansão do sistema, de forma que se possa suprir a demanda por energia, neutralizando os riscos de desabastecimento e respeitando os compromissos ambientais firmados em tratados e convenções internacionais (MME/EPE, 2020).

Somam-se ao exposto alguns desafios e dilemas enfrentados pelo governo brasileiro como a sua posição privilegiada quanto a disponibilidade de recursos renováveis para a produção de energia elétrica, em frente às dificuldades que são enfrentadas quando se fala em aumentar de forma maciça a participação dessas fontes de energia na oferta interna. Por outro lado, o desenvolvimento das reservas

de gás natural no pré-sal e as novas descobertas de bacias no pós-sal ampliam de forma significativa a oferta de gás natural nacional e reforçam o papel desse insumo como o principal combustível fóssil utilizado na expansão de energia nos últimos anos (MME/EPE, 2021).

Diante do aumento da oferta de gás natural, também aumentam as pressões por um uso cada vez maior desse combustível na matriz elétrica brasileira. Ao ceder a essa pressão, ocorre, necessariamente, um crescimento da participação das termelétricas na oferta interna de energia elétrica, já que o gás natural é o principal combustível utilizado nessas usinas em substituição ao carvão mineral. No entanto, apesar de ser considerado um fator importante para garantir a segurança operativa da matriz elétrica brasileira, é de suma importância discutir o aumento do uso dessa fonte em um momento em que a transição energética mundial parece se voltar cada vez mais para fontes de energia limpas e renováveis (MME/EPE, 2021).

Nesse cenário, diversas questões surgem ao se analisar os caminhos que o Brasil tem tomado para expandir sua capacidade de geração de energia elétrica, como o que tem sido feito ao pesquisar a diversificação da matriz elétrica para reduzir a dependência da geração hidráulica.

### **2.3.4 Países que já avançaram na transição da matriz energética**

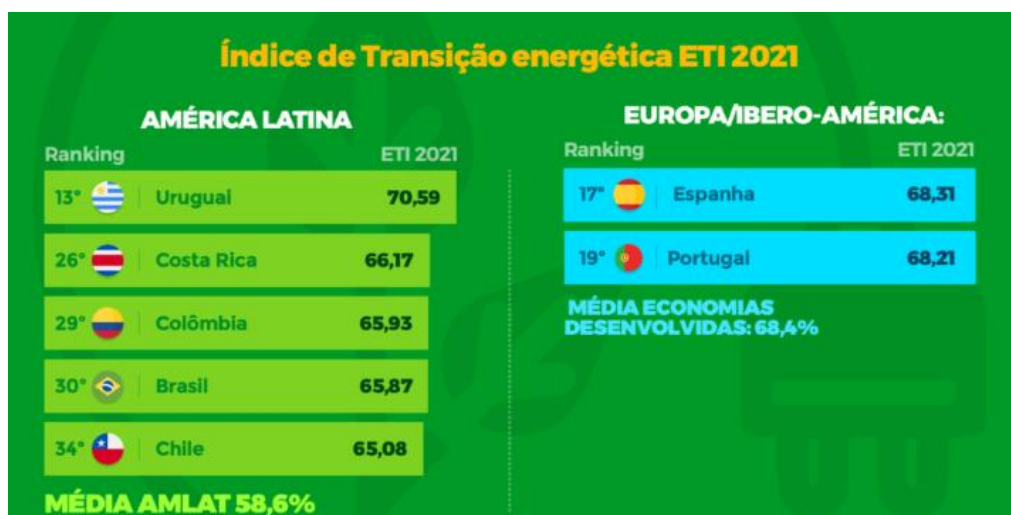
A Ibero-América está caminhando para o uso e consumo de energia limpa, embora em velocidades diferentes. O principal desafio é aumentar a produção de energia a partir de energias renováveis não convencionais (solar, eólica) e promover a eficiência energética para que as energias renováveis possam satisfazer todas as necessidades energéticas (SOMOS IBERO AMERICANA, 2022).

Uruguai, Costa Rica, Colômbia, Brasil e Chile são os cinco países latino-americanos mais avançados na transição energética, ocupando o primeiro lugar na América Latina e no Caribe, com um Índice de Transição Energética (ETI) médio regional de 58,6%. Segundo dados do relatório *Accelerating an Effective Energy Transition 2021* publicado pelo Fórum Econômico Mundial (SOMOS IBERO AMERICANA, 2022).

Espanha, classificada em 17º lugar no ranking mundial com uma pontuação de 68,31%, e Portugal, classificado em 19.º com 68,21%, pertencem ao grupo das economias mais avançadas em termos de sustentabilidade energética. Os países

desse grupo, liderados por Suécia, Noruega, Dinamarca, Suíça e Áustria, têm um índice médio de 68, graças ao progresso constante em tornar seus mercados de energia ambientalmente sustentáveis (SOMOS IBERO AMERICANA, 2022). A seguir, na Figura 3, é possível visualizar os índices de transição energética de alguns países.

Figura 3- Índices de transição energética



Fonte: SOMOS IBERO-AMÉRICA (2022)

### 2.3.5 Impacto econômico

A questão do impacto das energias renováveis na economia e a sua relação com o crescimento e o desenvolvimento econômico leva a pensar que a atividade socioeconômica não pode se desenvolver sem energia. Assim, energia significa não apenas crescimento e desenvolvimento econômico, mas também qualidade de vida por meio do potencial de desenvolvimento de novos produtos e infraestrutura (Silva, 2019).

Em 2017, o Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro nominal foi de R\$ 6.558.19.000.000,00, o PIB real foi de R\$ 2.05.969.000.000,00, a oferta interna de energia foi de 292.10<sup>6</sup> Toneladas de Petróleo Equivalente (TEP) e o consumo final de energia foi de 243.600.10<sup>3</sup> TEP. Em relação a 1994, o PIB nominal foi de R\$ 356.801.000.000,00, o PIB real foi de R\$ 1.035.375.071.200,00, a oferta interna de energia foi de 12.160.10<sup>6</sup> TEP e o consumo final de energia foi de 131.93.10<sup>3</sup> TEP. Estes números mostram uma relação de crescimento entre o PIB real, a oferta interna

de energia e o consumo final de energia, com aumentos de 98% e 82,5% e 85,26%, respectivamente (Silva, 2019).

As relações acima enfatizam a relação entre energia e negócios e a necessidade de desenvolvimento de energia para apoiar e acelerar o crescimento econômico. Com fontes de energia renováveis e melhorias sendo desenvolvidas, o potencial de crescimento econômico sustentável é excelente (Silva, 2019).

### **2.3.6 Políticas públicas e normativas para a transição energética**

Segundo ANP (2022, p.10) atualmente não há políticas públicas e normas específicas para transição energética no Brasil, mas há políticas que influenciam positivamente na transição energética tais como:

- Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC (Lei nº 12.187/2009): tinha como compromisso nacional voluntário a redução de 36,1% a 38,9% das emissões projetadas até 2020. O decreto nº 7.390/10, que regulamenta a PNMC, instituiu o PDE como o plano setorial de mitigação e adaptação à mudança do clima do setor de energia.
- Contribuição Nacionalmente Determinada – NDC: compromisso de reduzir, em 2025, as emissões de gases de efeito estufa 37% e, em 2030, a indicação de reduzir em 43%, tendo o ano de 2005 como referência. Tais medidas consideram todo o conjunto da economia em território nacional, não havendo uma distribuição formal da contribuição de cada setor específico.
- Política Nacional de Biocombustíveis – RenovaBio (Lei nº 13.576/2017): dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis e dá outras providências. Busca incrementar a produção e a participação dos biocombustíveis na matriz de combustíveis do Brasil, colaborar com previsibilidade para a participação competitiva dos diferentes biocombustíveis no mercado nacional de combustíveis e cooperar para o atendimento aos compromissos do Brasil no âmbito do Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.

- Novo Mercado de Gás (Lei nº 14.134/21, Decreto nº 10.712/21, Termo de Compromisso de Cessação – TCC Petrobras-CADE, Ajuste SINIEF/CONFAZ nº 03/2018): esses instrumentos e o detalhamento regulatório da ANP e das agências reguladoras estaduais dão substância ao Programa Novo Mercado de Gás, que visa estabelecer um mercado de gás natural mais aberto, diversificado, competitivo e eficiente para promover investimentos na expansão da infraestrutura e o aumento do uso do gás natural no Brasil.
  
- Modernização do Setor Elétrico, Consulta Pública nº 33/2017 (Aprimoramento do marco legal do setor elétrico): tem como objetivo aprimorar as propostas que viabilizem a modernização do setor elétrico, fundamentados nos pilares da governança, da transparência e da estabilidade jurídico-regulatória.
  
- Programa Combustível do Futuro, criou o Comitê Técnico Combustível do Futuro - CT-CF (Resolução CNPE nº 07/21): visa ampliar, o uso de combustíveis sustentáveis e de baixa intensidade de carbono com destaque para os seguintes objetivos:
  - Integrar políticas públicas associadas ao tema (RenovaBio), Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel, Proconve, Rota 2030, Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular e o CONPET;
  
  - Propor medidas para melhoria da qualidade dos combustíveis, com vistas a promover redução da intensidade média de carbono da matriz de combustíveis, da redução das emissões em todos os modos de transporte e do incremento da eficiência energética;
    - Propor metodologia de análise de ciclo de vida completo (do poço à roda) nos diversos modos de transporte;
  
    - Avaliar a possibilidade de aproximação dos combustíveis de referência aos combustíveis efetivamente utilizados;
  
    - Propor ações para fornecer ao consumidor as informações adequadas de modo a contribuir para a escolha consciente do veículo e da fonte de energia, considerando o ciclo de vida dos combustíveis;

- Propor estudos para criação de especificação de gasolina de alta octanagem;
- Propor estudos para viabilizar tecnologia de célula a combustível a etanol;
- Avaliar condições para introdução de querosene de aviação sustentável na matriz energética brasileira;
- Estabelecer estratégia nacional para uso de combustíveis sustentáveis no transporte marítimo; e
- Estabelecer condições para uso de tecnologia de captura e armazenamento de carbono associadas a produção de biocombustíveis.

## **2.4 Geração termelétrica**

A produção termoelétrica consiste em converter a energia química contida em combustíveis líquidos, sólidos ou gasosos em energia térmica durante o processo de combustão. Essa energia térmica (calor) é por sua vez convertida em trabalho em motores térmicos que, por estarem ligados a um gerador elétrico, produzem eletricidade (IEMA, 2016).

### **2.4.1 Ciclos termodinâmicos**

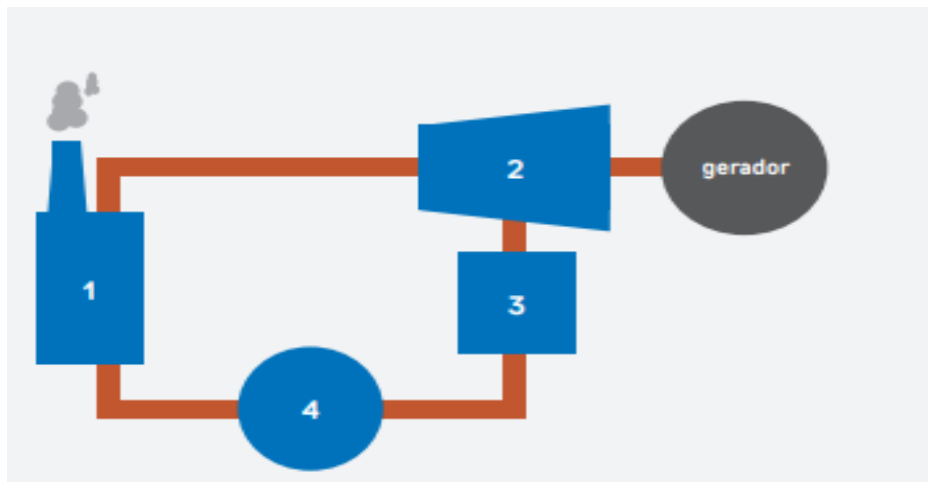
Os ciclos termodinâmicos se dividem em ciclos com e sem mudança de fase do fluido de trabalho. Conforme descrito nos tópicos a seguir.

#### **2.4.1.1 Ciclo Rankine**

Utiliza como fluido de trabalho a água. O vapor a alta pressão é produzido em uma caldeira (1), após o que é transferido para uma turbina, onde gira as pás e perde pressão (2). O calor, que vem do combustível, é fornecido à caldeira para transformar a água em vapor no interior dessa. A rotação das pás da turbina é transmitida através do eixo para o gerador elétrico. Após perder pressão na turbina, o vapor passa pelo condensador (3) pois deve retornar ao estado líquido para retornar à caldeira através da bomba (4) para um novo ciclo, gerando mais trabalho (IEMA, 2016). A Figura 4 mostra os elementos de um ciclo Rankine simples.



Figura 4- Elementos do ciclo Rankine simples

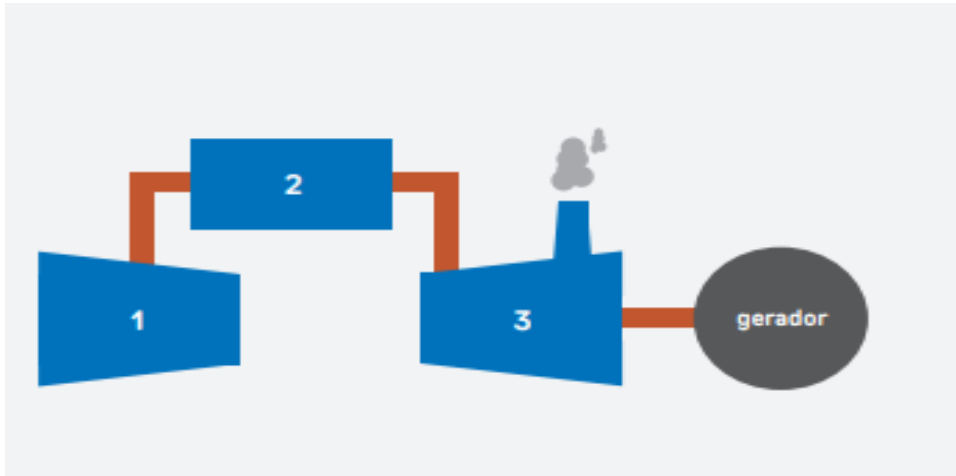


Fonte: Instituto de Energia e Meio Ambiente (2019)

#### 2.4.1.2 Ciclo Brayton

Neste ciclo o ar é o fluido de trabalho e não há mudança de fase. O ciclo Brayton é usado no circuito onde o calor é adicionado a pressão constante. Desta forma, o gás natural, ou um combustível gasoso, é alimentado na câmara de combustão (2) juntamente com o ar do compressor (1), e após a combustão desta mistura, os gases de combustão são direcionados para a turbina (3), que inicia o movimento. Novamente, a turbina é conectada a um gerador para produzir eletricidade. Após a passagem pela turbina, os gases são liberados na atmosfera, o que caracteriza as emissões atmosféricas do ciclo. Os elementos que compõem o ciclo Brayton são mostrados na Figura 5.

Figura 5 - Elementos do ciclo Brayton simples

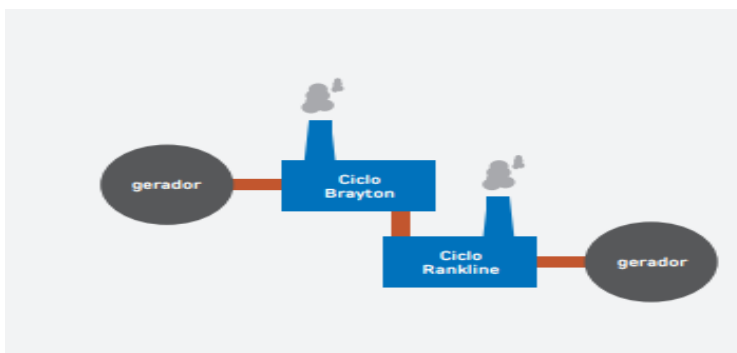


Fonte: Instituto de Energia e Meio Ambiente (2019)

#### 2.4.1.3 Ciclo combinado

O ciclo combinado é o resultado da conexão entre o ciclo Brayton e o ciclo Rankine. Esta conexão é vantajosa porque a temperatura de exaustão do ciclo Brayton (cerca de 500°C) é da mesma ordem de grandeza que a temperatura de entrada do ciclo Rankine. Na combinação dos dois ciclos, uma caldeira de recuperação de calor é utilizada como elemento de conexão, responsável por utilizar a energia contida nos gases de exaustão da turbina a gás para produzir o vapor necessário no ciclo Rankine. Nesta caldeira, mais combustível pode ser adicionado após a queima para fornecer ainda mais calor ao vapor, Figura 6.

Figura 6 - Ciclo combinado

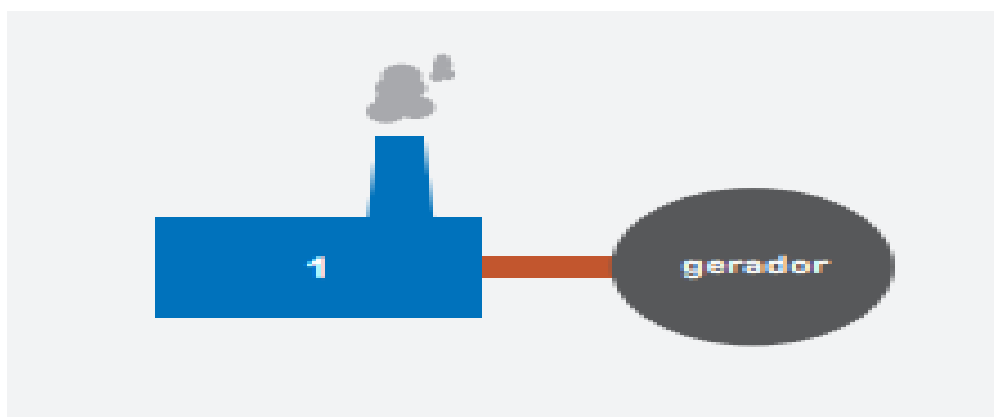


Fonte: Instituto de Energia e Meio Ambiente (2019)

#### 2.4.1.4 Motores à combustão

Motores à combustão convertem energia térmica, resultante da queima de um combustível, em trabalho mecânico. Motores de combustão interna, indicado pelo número 1 na Figura 7, são aqueles em que o combustível é queimado dentro do dispositivo em um mecanismo composto por um pistão, uma biela e um virabrequim, onde o movimento recíproco do pistão dentro do cilindro é convertido em movimento rotativo. Este movimento rotativo está ligado ao eixo do gerador elétrico, que produz eletricidade. As emissões atmosféricas ocorrem no próprio motor (IEMA, 2016)

Figura 7- Motor de Combustão Interna



Fonte: Instituto de Energia e Meio Ambiente (2019)

### 2.5 Combustíveis mais utilizados na geração termoeletrica

Este tópico apresenta os principais tipos de combustíveis utilizados em usinas termelétricas no Brasil. Numa visão sistemática, o combustível é o fator que determina o mercado da usina termelétrica, o valor energético e as vantagens e desvantagens de cada tipo de equipamento de produção. Será dada ênfase à biomassa casca de arroz, foco deste estudo.

### **2.5.1 Carvão mineral**

O carvão fóssil é uma rocha sedimentar combustível, formada a partir de restos vegetais que se encontram em vários estados de conservação, foram soterrados e posteriormente compactados (Tolmasquim, 2016).

Aqui, o termo carvão modificado será usado para tipificar os quatro estágios da evolução do carvão: turfa, linhita, hulha, antracito, sendo a turfa a menos carbonizada e o antracito o mais carbonizado. Os depósitos de carvão são encontrados em bacias sedimentares e/ou depressões preenchidas por sedimentos resultantes do movimento das placas tectônicas. O carvão é gerado pela decomposição de plantas superiores e restos de plantas terrestres (troncos, galhos, sementes, pólen), cuja deposição sofreu processos de compactação e transformação ao longo de milhões de anos como resultado do aumento da pressão e temperatura, concentração de carbono e de hidrogênio (carbonificação). Devido ao seu alto teor, o carbono é o principal elemento químico do carvão (Tolmasquim, 2016).

### **2.5.2 Gás Natural**

O gás natural é uma fonte de energia versátil com ampla base de recursos em diversos países, podendo atender a demandas de diversos setores como indústria, energia, habitação, comércio e transporte. O gás natural pode ser consumido diretamente como matéria-prima (uso não energético) e indiretamente pela queima para produção de eletricidade ou calor. Na indústria e edifícios, é mais frequentemente usado para gerar calor. O gás natural é queimado em usinas termelétricas, que convertem energia térmica em energia mecânica, que é então convertida em energia elétrica (TOLMASQUIM, 2016).

O gás natural é considerado um combustível cada vez mais importante na matriz energética mundial e para o desenvolvimento de sistemas energéticos de baixo carbono, pois oferece estabilidade e segurança no fornecimento de energia, além de queima com menores emissões em relação ao carvão e derivados de petróleo (WGC, 2015). É considerado um combustível de queima limpa – produzindo principalmente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e água – e emite significativamente menos CO<sub>2</sub> do que outros combustíveis fósseis, especialmente quando usado em turbinas a gás de ciclo combinado de alta eficiência. Por esses motivos, a geração termelétrica a gás natural

é uma alternativa para complementar a geração a partir de fontes renováveis intermitentes, como eólica e solar, além de ser utilizada para atender às demandas de ponta. No Brasil, as termelétricas a gás natural também complementam a geração predominantemente hidrelétrica e desempenham um papel importante no planejamento da expansão energética de longo prazo (Tolmasquim, 2016).

### **2.5.3 Biomassa**

O aproveitamento da energia da biomassa disponível foi essencial para a evolução humana, e em conjunto progrediram os seus próprios métodos de obtenção e utilização, desde a lenha recolhida para cozedura, proteção e aquecimento até à moderna silvicultura, processos de produção agrícola e industrial, conversão e utilização de biocombustíveis para produzir calor, eletricidade. Esta última, símbolo do desenvolvimento tecnológico e ambiental, é objeto deste estudo. A principal biomassa utilizada para gerar eletricidade no Brasil é o bagaço da cana-de-açúcar. Sua presença no cenário nacional é crescente graças às prósperas indústrias de etanol e açúcar instaladas em solo nacional (Tolmasquim, 2016).

Historicamente, uma das políticas mais marcantes para a introdução de biocombustíveis no mercado brasileiro foi o Programa Nacional do Álcool (Proálcool 1) em 1975. Graças a ele, o setor sucroenergético nacional se consolidou e expandiu, tornando-se referência internacional. O Proálcool é considerado um programa pioneiro de biocombustível e teve como principal objetivo produzir um combustível alternativo nacional, pois após as crises do petróleo de 1973 e 1979, o preço desse produto e de seus derivados aumentou significativamente, o que afetou fortemente o balanço de pagamentos (EPE, 2015).

#### **2.5.3.1 Casca de arroz para geração termelétrica**

O Rio Grande do Sul (RS) é o maior estado produtor de arroz do Brasil, que formará a safra 2022/2023 com cerca de 90 por cento da colheita total do país, 10 milhões de toneladas. Assim, ao lado da soja e do trigo, o arroz é um dos produtos agrícolas mais importantes do país. A maior parte do arroz produzido no estado do RS é processado, incluindo secagem, descasque e embalagem, dentro do próprio estado, geralmente em engenhos regionais próximos às áreas de produção.

O descarte inadequado da CA causa impacto ambiental, pois o material tem um longo período de decomposição. Por isso, seu reaproveitamento é importante. Devido a esse grande volume, a CA pode ser utilizada de maneira sustentável na produção de energia elétrica, pela queima em turbinas a vapor, nas empresas beneficiadoras ou então transferidas para uma usina geradora. É importante salientar que, por ser de origem vegetal, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) produzido na combustão da casca é reabsorvido pelas plantas durante a fotossíntese.

### 2.5.3.2 Estado da arte

A seguir na Quadro 1 são mostradas pesquisas correlatas sobre cogeração com casca de arroz.

Quadro 1 — Pesquisas correlatas

<b>Título</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Resultados</b>	<b>Link</b>
Geração de Energia Através da Casca de Arroz: Uma Análise Ambiental	analisar as vantagens ambientais advindas do uso da casca de arroz como fonte energética em um projeto de geração termelétrica, sua relação com o protocolo de Quioto, redução de emissões, e ainda benefícios deste tipo de projeto para as empresas.	São necessárias iniciativas no sentido de conscientizar a população em geral, e os empresários, de que projetos como esse tendem a contribuir efetivamente para a sociedade como um todo sendo capazes de gerar benefícios econômicos, sociais e	<a href="https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2007_tr650480_0007.pdf">https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2007_tr650480_0007.pdf</a>

		principalmente ambientais	
A cogeração de energia e a sua inserção em indústrias arrozeiras utilizando a casca de arroz	realizar a revisão bibliográfica sobre a cogeração termelétrica de energia associada a ambientes industriais, utilizando biocombustíveis – mais especificamente a casca de arroz.		
ENERGIA RENOVÁVEL: Uso da Cogeração Baseada em Biomassa da Casca de Arroz como Elemento Alternativo para a Indústria Manufatureira Brasileira	Realizar um estudo a fim de conhecer as fontes alternativas de energia disponíveis no Brasil, com foco nos sistemas de cogeração a partir da utilização da biomassa de casca de arroz como fonte de produção de energia.	foi possível realizar um estudo da utilização da casca de arroz para a geração de energia, conclui-se que com os valores encontrados, esse tipo de processo torna-se viável financeiramente e ecologicamente.	<a href="http://repositorio.unitau.br/jspui/bitstream/20.500.11874/5449/1/Rosiane%20C.%20da%20Silva%20e%20Tais%20A.%20R.%20da%20Rocha.pdf">http://repositorio.unitau.br/jspui/bitstream/20.500.11874/5449/1/Rosiane%20C.%20da%20Silva%20e%20Tais%20A.%20R.%20da%20Rocha.pdf</a>

Fonte: ELABORADO PELO AUTOR (2023)

### 2.5.3.3 Cinza da casca de arroz

No caso da geração de energia pela combustão direta da casca de arroz, o resíduo final é a cinza impura. Utilizando-se a CCA para algum fim comercial, fecha-se o ciclo da industrialização do arroz, sendo possível o total aproveitamento da matéria-prima proveniente da lavoura, já que farelo, gérmen e outras partes já têm seu destino no mercado. Afinal, uma produção industrial ideal é aquela que gera resíduo zero (Ojeda, 2022).

Projetos de reaproveitamento são importantes para evitar o descarte inadequado, minimizando, dessa forma, a deposição em terrenos baldios ou lançamento em cursos d'água, ocasionando poluição e contaminação de mananciais. Diante disso, o não aproveitamento desse material não pode mais ser aceito pela sociedade. Por isso, muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos com o intuito de utilizar esse produto em diversos setores industriais da construção civil (Ojeda, 2022).

Consequentemente, seria um grande desperdício de matéria-prima nobre jogá-la fora, já que pode ser usada em vários ramos industriais, tais como: eletrônica, construção civil, cerâmica, indústria química, fabricação de células fotovoltaicas, entre outros (Hoffman *et al.*, 2010).

O teor de sílica contido nas CCA, a torna um resíduo com valor econômico. No entanto, essa cinza só terá alto valor econômico se tiver alta qualidade, que é mensurada pela alta superfície específica, tamanho e pureza de partícula. Com base nesses aspectos, para definir sobre a aplicação da CCA é importante a caracterização do material (Ojeda, 2022).

## 2.6 Princípios de Cogeração

A cogeração é um processo de produção de energia, definido em inglês como CHP (*Combined Heat and Energy*), a integração é definida como a geração conjunta e combinada de energia térmica e elétrica ou térmica e mecânica, sua principal vantagem é sua excelente combinação de energia (Brasil, 2005 apud Rocha, 2017).

Este processo de geração apresenta uma série de características que contribuem para a sustentabilidade e proteção do meio ambiente, além disso, possui uma série de fatores que têm atraído as empresas, como a redução de custos e impactos ambientais, outro ponto importante é que a autossuficiência e a



confiabilidade, obtidas a partir de materiais e combustíveis confiáveis e sem interrupção, fato que ocorre em algumas regiões no fornecimento de energia elétrica.

Para avaliar a eficiência desse processo, é necessário utilizar os fundamentos da Termodinâmica, que é entendida como a ciência que estuda a relação entre a troca de calor e o trabalho realizado em determinado processo. A partir desses fundamentos é possível quantificar e verificar a qualidade da energia gerada no processo (Santos e Novo, 2008).

### **2.6.1 Projeto de cogeração**

Desde a projeção até a implantação bem-sucedida, destacam-se três fases: estudo de viabilidade, projeto básico e projeto maior (Balestieri, 2002).

Ao estudar a possibilidade de utilização do sistema de cogeração termelétrica, é necessário responder previamente a alguns fatores básicos como: Finalidade da usina; combustível disponível; às necessidades de calor e eletricidade a serem atendidas; Tecnologia existente; Opções de configuração (Paro, 2011).

As limitações dos projetos de integração decorrem de limites técnicos (muito simples), ultrapassando limites econômicos (médios) e atingindo limites legais (mais complexos) - instituições e meio ambiente. Em outras palavras, para poder desenvolver opções técnicas livremente a partir de uma combinação de tecnologias disponíveis, a análise técnica deve preceder a análise econômica e jurídica (Balestieri, 2002).

### **2.6.2 Benefícios da cogeração**

Resolução ANEEL nº. 21/2000 que menciona que a atividade de cogeração tem grande papel em contribuir com a racionalidade energética, pois permite um melhor aproveitamento dos combustíveis, resultando em menor consumo total, do que a geração de calor e eletricidade individual. Dessa forma, muitos países têm estabelecido e desenvolvido diversas formas de promover o uso da cogeração para aprimorar o uso dessa tecnologia (Barja, 2006).

Nos Estados Unidos, o controle de fusões foi enfatizado após a publicação de um ato regulatório denominado PURPA (*Public Utilities Regulatory Policy Act*), em 1978, que definiu as normas regulatórias do ramo. Em 2005, foi publicada e

promulgada a EPA 2005 (Lei de Política Energética), que define incentivos à microgeração e define regras para compras e vendas obrigatórias de usinas de energia. A EISA (Lei de Independência e Segurança Energética), criada em 2007, considera a cogeração oficialmente como prática de eficiência energética. Em 2011, diretrizes foram publicadas no código federal da regulamentação dos Estados Unidos tratando qualificação de centrais de cogeração (Paro, 2011).

Na União Europeia, temos o modelo adotado pela Dinamarca, como um dos principais benefícios trazidos na atividade de cogeração: financiamento para a construção de usinas de aquecimento urbano administradas pela organização, incentivar o uso do vapor, por meio de subsídios para instalações de aquecimento para setores industrial e comercial; estimular a melhoria da eficiência do processamento (uso consolidado), com subsídios para os setores; pagamento (aproximadamente R\$ 295,00 por MWh) pela eletricidade injetada na rede, produzida em usinas de cogeração; criação de impostos para financiar novas usinas (Barja, 2006). Segundo Costa (2013):

O Brasil, seguindo modelos de países que obtiveram sucesso em sua política de auxílio e suporte aos sistemas de cogeração, iniciou seu marco regulatório sobre o assunto no ano de 1996. Neste ano, foi atribuída a primeira vantagem ao agente cogrador, frente aos demais agentes geradores: o Decreto nº. 2.003 permite ao cogrador a comercialização de energia elétrica junto aos integrantes de seu complexo industrial ou comercial, aos quais forneça vapor ou outro insumo oriundo de processo de cogeração, mesmo que este consumidor venha a ser cativo da concessionária de distribuição ou transmissão (de acordo com o atual aparato legislativo o consumidor cativo apenas poderia ser suprido pela concessionária ou permissionária de eletrificação). (COSTA, 2013, p. 70)

É importante destacar que as termelétricas cogradoras funcionam a partir de combustíveis renováveis, independentemente da eficiência do sistema, usufruem dos mesmos benefícios das usinas qualificadas.

### **2.6.3 Participação da Cogeração nas Fontes de Energia Industrial**

Existem muitos processos que requerem aquecimento a uma determinada temperatura, seja um processo industrial ou comercial. Por isso, recomenda-se a pesquisa integrada de uso, onde a relação potência/calor, intensidade de uso e temperatura determinam a tecnologia utilizada (Barja, 2006).

Os processos de cogeração podem ser aplicados em diferentes setores de atividades: no setor industrial, a cogeração é utilizada para a geração de calor em processos e produção de vapor (indústrias químicas, petroquímicas, farmacêuticas, etc.). Ainda no mesmo setor, essa tecnologia pode ser utilizada para a geração de energia térmica na forma de vapor (indústria de vidro, de alimentos, cerâmica, etc.). Além disso, é utilizada no setor terciário, comércio e serviços para aplicações em ar-condicionado central, aquecimento de água, e energia elétrica (shoppings, centros comerciais, hotéis, hospitais, etc.) (Brasil, 2005).

Segundo Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Recursos Energéticos e Ambiente no que tange a cogeração:

A viabilidade para sistemas de cogeração deve focar em sua fase analítica o entendimento e a mensuração de rendimento dos equipamentos e matérias-primas utilizados na planta em questão. É necessário que haja uma convergência entre disponibilidade de matéria-prima (especialmente o combustível a ser utilizado) e a planta de forma a otimizar a estrutura para obtê-la diminuindo investimentos e, desta maneira, o tempo de retorno sobre eles. Os equipamentos planejados para atender à produção de energia devem adequar-se a uma planta industrial calculada em função do potencial de demanda energética que se espera obter - tanto as formas de energia deslocadas para os próprios processos industriais internos quanto à energia que se espera poder repassar às linhas de distribuição mensuradas em função do gasto interno e da demanda existente no cenário energético regional e nacional (Cogeração USP, 2013, p. 18).

#### **2.6.4 Unidades de cogeração no estado do Rio Grande do Sul**

No estado do Rio grande do Sul há cinco usinas em operação que têm como combustível a casca de arroz, conforme mostra a Figura 8. Estando localizadas nas seguintes regiões:

- CAMIL; Itaqui, potência de 4MW
- CEREALISTA PILECCO; Alegrete, potência de 4MW
- COOPERATIVA AGROINDUSTRIAL ALEGRETE; Alegrete, potência de 4MW
- URBANO AGROINDUSTRIAL; São Gabriel, potência 2,2 MW
- CORADINI, Bagé, potência de 1,2 MW

Figura 8 - Localização das unidades de cogeração



Fonte: PLANETA ARROZ (2012)

## 2.7 Importação de energia elétrica e energia de reserva

Dependendo da situação, uma central de cogeração também pode importar eletricidade. Esta situação ocorre ora quando necessita de energia elétrica para suprir suas necessidades elétricas (no caso de um autoprodutor), ora quando termina o ciclo de produção (devido à temporada de combustível, exemplo colheita de arroz, manutenção do sistema de produção, etc.). Nesses casos, o agente de geração de energia que necessitar de atendimento deverá adquirir a energia usada ou assinar um contrato de reserva de capacidade (COSTA, 2013).

Com relação à compra de energia elétrica, esta pode ser feita em dois locais: no mercado livre, o consumidor poderá escolher seu próprio agente gerador, desde que atenda aos requisitos estabelecidos pela ANEEL, e na área regulada, ele compra energia elétrica do distribuidor local, à tarifa especificada (mercado cativo) (Costa, 2013).

A contratação de energia reserva tem por objetivo garantir e assegurar o suprimento total ou parcial das necessidades elétricas das unidades consumidoras diretamente conectadas às instalações de Autoprodutor de Energia elétrica ou

Produtor Independente de Energia Elétrica, na hipótese de indisponibilidade de geração de energia elétrica (devido a uma interrupção temporária). De acordo com a Resolução ANEEL nº. 371/1999, a contratação da instalação da capacidade de reserva do sistema elétrico deve ser feita com a concessionária ou licenciado, devendo ser estimada previamente a capacidade necessária (limitada a 30 MW) e as horas previstas. No entanto, a eletricidade associada à reserva de capacidade (em MWh), ou energia de backup, deve ser incluída no escopo do Ambiente de contratação livre, por meio de contratos bilaterais livremente negociados, registrados na CCEE. 371/1999 (Barja, 2006).

### 3 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos, dividiu-se a metodologia em partes distintas, porém interligadas.

#### **Primeira Etapa:**

Realizou-se uma pesquisa exploratória e descritiva sobre o tema geração e cogeração de energia a partir da casca de arroz. Esse tipo de pesquisa, como o próprio nome indica, teve como objetivo examinar um tema, conceito ou algo sobre o qual a comunidade acadêmica ainda não possui pleno conhecimento. Visa, portanto, proporcionar maior familiaridade com o problema, a fim de ser mais específico ou desenvolver ideias relacionadas à questão de pesquisa. Sua estrutura é flexível, adequada aos mais diversos aspectos relacionados à realidade a ser estudada. Na maioria dos casos, esse tipo de pesquisa envolve alguma forma de pesquisa bibliográfica e/ou estudo de caso (Azevedo, 2020).

A pesquisa descritiva destinou-se a descrever as características de uma determinada entidade ou população, ou a estabelecer relações entre variáveis auto representantes. Sua característica é a coleta de dados, que pode ser feita por meio de questionários ou observações sistemáticas. A pesquisa descritiva geralmente utiliza formas de pesquisa e/ou pesquisa documental (Azevedo, 2020).

A revisão bibliográfica é uma parte importante de toda pesquisa científica e é feita a partir de literatura publicada, especialmente artigos e livros científicos. Hoje, com a ampla disponibilidade e fácil acesso aos artigos científicos, eles se tornaram uma importante fonte de apoio à pesquisa científica. No entanto, há pesquisas feitas especificamente em fontes literárias em que o pesquisador busca a base e o conteúdo de seu trabalho em obras de outros autores. Podem ser feitos como um estudo comparativo, onde métodos e/ou resultados apresentados por outro estudo são comparados para destacar pontos fortes e fracos, como um estudo piloto no qual o pesquisador busca uma base para formular uma questão de pesquisa e gerar hipóteses para sua solução (Azevedo, 2020).

A primeira fase da pesquisa foi realizada com a identificação das principais literaturas publicadas sobre o estudo, onde foram identificadas as fontes clássicas com os autores dos principais trabalhos relacionados à biomassa como fonte geradora

de energia, também foi realizada uma busca sobre o assunto na Internet, acessando sites acadêmicos e de instituições relacionadas a assuntos sobre Cogeração e Energias Renováveis, fazendo-se uso de publicações como livros, teses, dissertações, artigos e textos.

Os artigos foram extraídos de anais de congressos relacionados ao tema, de revistas acadêmicas e bases de trabalhos acadêmicos de universidades de renome. Esta etapa foi incluída na revisão da literatura.

### **Segunda etapa:**

A partir do volume de casca de arroz gerado no Rio Grande do Sul, no período compreendido entre 2010 e 2020 estimou-se o potencial de energia gerada.

### **Terceira Etapa:**

Para projetar um sistema sem geração de resíduos, caracterizou-se as cinzas da casca de arroz, visando seu reaproveitamento em argamassas cimentícias. A cinza analisada foi cedida pelo Engenho Coradini localizado na cidade de Dom Pedrito.

## **3.1 Técnicas de caracterização das cinzas**

Difração de raios-X (DRX) - A caracterização microestrutural foi realizada por meio de DRX no Laboratório de raios-X (LRX) da UNIPAMPA em equipamento Rigaku modelo ULTIMA IV com geometria Bragg-Brentano nas condições operacionais: 40 kV/20 mA, radiação linha k- $\alpha$  do cobre e passo de 0,05°/s.

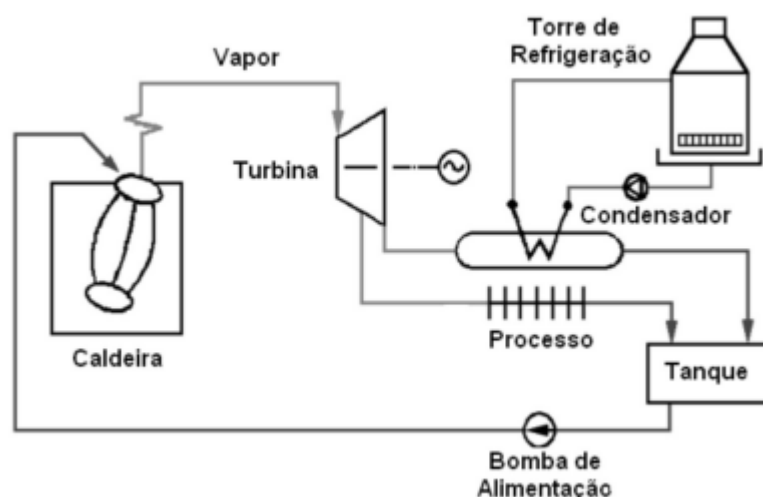
Fluorescência de raios-X (FRX) - As análises químicas foram realizadas por meio do FRX equipamento de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X, marca Bruker, modelo S1 Turbo SD LE, no LATRAM - Laboratório de Lavra e Tratamento de Minérios da Universidade Federal do Pampa, campus Caçapava do Sul.

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) - A aquisição das imagens por MEV foi realizada em um equipamento da marca SSX 500, *Superscan – Shimadzu* com tensão de 15 kV e detecção de imagens de elétrons secundários da Universidade Federal de Pelotas.

### 3.2 Cogeração em beneficiadoras de arroz

A Figura 9 exemplifica o sistema de cogeração de uma planta de uma usina térmica. Segundo Pretz (2001), basicamente esse sistema é uma caldeira que queima a casca de arroz como consequência produz vapor superaquecido para o sistema gerador. O vapor de pressão efetiva é removido da turbina para o processo principal, enquanto o restante do vapor sai da turbina a baixa pressão e entra no condensador. O condensado é então drenado para o tanque principal junto com a água de reposição para compensar as perdas. A mistura do tanque é bombeada para a caldeira principal, fechando assim o ciclo térmico, um esquema do sistema de cogeração.

Figura 9 - Ciclo de Cogeração



Fonte: Pretz(2001)

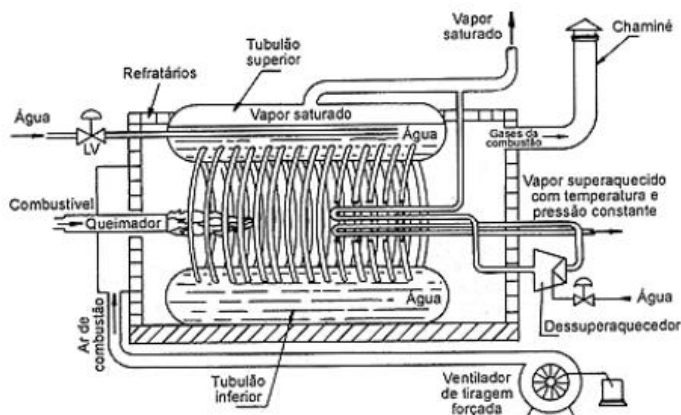
Os parâmetros para escolha da caldeira adequada no caso estudado, foram: pressão e o consumo de vapor do processo da indústria. O consumo de vapor na indústria de beneficiamento é de 5,5 tonelada hora de vapor com pressão de 10kgf/cm<sup>2</sup>/220°C, a escolha da turbina para essa situação é de dados nominais de consumo 5,5t/h de vapor pressão 42 kgf/cm<sup>2</sup> / 420°C o tipo de queima do combustível, que segundo Pretz (2001) é de um sistema leito fluidizado o que mais se adequa a queima do combustível estudado.

Para esse estudo se escolheu uma caldeira aquatubular, Figura 10, que produz vapor superaquecido de 42kgf/cm<sup>2</sup> / 420°C, com uma produção máxima de 15t/h de vapor e eficiência de 88%, que utiliza casca de arroz como combustível. A água que



retorna desse processo tem temperatura de 120°C. Sabe-se que a usina utilizará 13,5 t/h de vapor e a quantidade de combustível necessária para gerar esse vapor é de 3,1 t/h de casca de arroz.

Figura 10 - Caldeira aquatubular



Fonte: Bega (2003)

Ao escolher uma turbina, foram levados em consideração seu consumo de vapor, pressão e temperatura de operação. Neste projeto, a turbina possui as seguintes características:

- Potência bornes do gerador: 1200 kW
- Pressão entrada: 42 Bar Temperatura entrada:
- 420 °C Vazão entrada: 13.500 Kg/h
- Pressão de extração: 10,6 Bar
- Vazão de extração: 8.000 Bar
- Pressão de escape: 1,05 Bar
- Vazão de escape: 5.500 Kg/h
- Rendimento: 29.8 %

O gerador especificado neste projeto é de 1200 kW e 13800 V (eletricidade para usinas de processamento de arroz e utilidades). É um sistema gerador síncrono de 4 polos, frequência de 60 Hz, 1800 rpm, eficiência de 96%.

Maffioletti (2013) realizou um estudo de caso da cogeração associada ao beneficiamento de arroz, e obteve os seguintes dados; uma unidade de beneficiamento com uma capacidade de armazenamento superior a 3 milhões de sacos de arroz, com recebimento médio de 83000 toneladas de arroz com casca por ano gera 18300 toneladas de casca de arroz por ano, devido ao percentual da casca no peso do arroz bruto ser 22%, Adicionando se as impurezas que resultam da limpeza do arroz em casca se somam 3000 toneladas de biomassa.

Ainda no estudo do autor supracitado, consolida que a utilização da biomassa é essencial, uma vez que está relacionada tanto a benefícios ambientais como econômicos, tais como a comercialização de créditos de carbono e a redução em faturas de energia elétrica para empresas a partir da cogeração pelo uso da casca de arroz.

#### 4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foram coletados e processados os dados de uma produção média de arroz de no estado do Rio Grande do Sul, abrangendo o período entre 2010 e 2020. Pode-se observar, conforme Tabela 2 e Figura 11 o montante produzido. A partir dessa quantidade, estimou-se o volume de casca gerado.

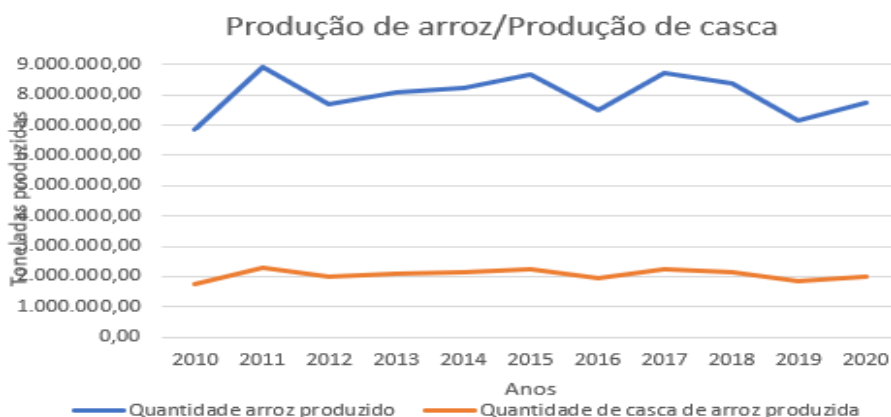
Conforme afirma Cardoso (2012), a palha corresponde a 0,038 toneladas por tonelada de arroz produzido, que é o resíduo deixado no campo após a colheita e a casca representa 22% do peso total do arroz. As porcentagens acima são levadas em consideração ao preparar a tabela apresentada Tabela 1.

Tabela 1 - Dados referentes a safra de arroz

Ano	Quantidade arroz produzida (T)	Palha 3,8% (T)	Casca de arroz 22% (T)
2010	6875077	261252,926	1512516,94
2011	8940432	339736,416	1966895,04
2012	7692223	292304,474	1692289,06
2013	8099357	307775,566	1781858,54
2014	8241840	313189,92	1813204,8
2015	8679489	329820,582	1909487,58
2016	7493431	284750,378	1648554,82
2017	8733110	331858,18	1921284,2
2018	8401787	319267,906	1848393,14
2019	7172101	272539,838	1577862,22
2020	7753663	294639,194	1705805,86

Fonte: Elaborado pelo autor (2023) com base nos dados do atlas socioeconômico do Rio Grande do Sul (2022)

Figura 11 - Produção de casca



Fonte: Elaborado pelo autor (2023) com base nos dados do atlas socioeconômico do Rio Grande do Sul (2022)

Para a estimativa do potencial de geração de energia a partir da casca de arroz foi a utilização da Equação 1 (Cenbio, 2008):

$$\frac{E(\frac{MW}{ano})}{(860*8.322)} = \frac{arroz * 0,22038 * PCI \frac{kcal}{kg} * 0,15}{(860*8.322)} \quad \dots(1)$$

Onde 22,038% representam o total de resíduo aproveitável do peso total do arroz com casca. O Poder Calorífico Inferior (PCI) da casca é 3.384,09 kcal / kg e para a conversão para kWh/kg é necessário dividir a equação por 860. Considerando que o sistema opere o ano inteiro e que ocorra em 95% das horas anuais, é utilizado o valor de 8.322 horas de operação / ano (CENBIO, 2008).

$$E(MW/ano) = \frac{7.753.633,00 * 0,22038 * 3.384,09 * 0,15}{860 * 8.322} = 142 MW/ano \quad \dots (2)$$

Para o projeto de cogeração, utilizou-se como base o trabalho da Martins (2019). A autora realizou um estudo no Engenho Coradini Ltda, localizada na cidade de Dom Pedrito, Rio Grande do Sul, na sua planta industrial conta com os seguintes equipamentos:

## Caldeira

Para a mudança de fase da água de líquido para vapor se utilizam caldeiras, as quais são dispositivos que convertem energia química em térmica, a partir da combustão de um combustível, trabalhando a uma pressão maior que a atmosférica. A caldeira utilizada no processo de cogeração é uma BREMER do tipo mista Figura 12, cujos dados nominais constam na Tabela 2 (Martins, 2019).

Figura 12 – Caldeira



Fonte: Martins (2019)

Tabela 2 - Dados de fabricação retirados do manual

DESCRIÇÃO	
Tipo de gerador de vapor	Flamotubular horizontal
Tipo de fornalha	Aquatubular
Pressão de trabalho - vapor saturado	23 Kgf/cm <sup>2</sup>
Pressão de trabalho - vapor superaquecido	21 Kgf/cm <sup>2</sup>
Temperatura de vapor saturado	220,72 °C
Capacidade de produção de vapor saturado	12000 Kg/h
Carga térmica do vapor superaquecido	8.433.600 Kcal/h
Carga térmica líquida da caldeira	7.389.102 Kcal/h
Carga térmica total da caldeira	9.389.102 Kcal/h

Fonte: Martins (2019)

Segundo Martins (2019) a caldeira é constituída por:

- Fornalha

Câmara de combustão, onde ocorre a queima da biomassa. A escolha do combustível implica no tipo de fornalha. Neste caso, se utiliza uma grelha rotativa e a alimentação do combustível é automatizada.

- Grelha

Local onde se administra o combustível para logo ocorra a combustão. A grelha rotativa utilizada nesta planta realiza transporte lento e contínuo do combustível, assim como a remoção das cinzas produzidas pela queima.

- Pré-aquecedor de ar

Dispositivo responsável pelo aquecimento do ar antes de sua entrada na fornalha, proporcionando recuperação da energia residual presente nos gases de combustão, aliada a melhoria na eficiência da caldeira, pois implica na redução da umidade do combustível.

- Filtro Multiciclone

É responsável pela retirada de partículas dos gases de escape para a atmosfera. Ao entrar no filtro, os gases seguem uma trajetória helicoidal que, por força centrífuga, força as partículas mais pesadas a entrarem nas paredes do vórtice e por gravidade, depositam-se no fundo do filtro, onde são recolhidas em um recipiente de fácil troca.

- Filtro de mangas

O filtro de mangas é um dispositivo utilizado para potencializar a filtragem dos gases emitidos; sua finalidade é recuperar produtos industriais sólidos e gases limpos por meio da remoção de poluentes. A filtragem é realizada pela passagem de

partículas contendo gás através das mangas, que são elementos filtrantes. Esse processo permite que as partículas fiquem retidas na superfície do tecido e nos poros das fibras.

## Turbina

A turbina utilizada no Engenho Coradini é uma turbina de condensação direta, Figura 13, impulso/semi-reação do fabricante ENGECROL INDÚSTRIA E COMERCIO DE EQUIPAMENTOS LTDA, com dados nominais Tabela 3 (Martins, 2019).

Figura 13 – Turbina



Fonte: Martins (2019)

Tabela 3 - Dados nominais turbina

DESCRIÇÃO		UNIDADE
Pressão de entrada de vapor	0,12	BAR-A
Temperatura de entrada de vapor	270	°C
Pressão de saída de vapor	22	BAR-A
Temperatura na saída do vapor	49	°C
Rotação nominal da turbina	8000	RPM
1 velocidade crítica da turbina	9200	RPM
2 velocidades crítica da turbina	-	RPM
Potência nominal da turbina-bornes gerador	1200	KW
Vazão de vapor na entrada	8	TON/H
Consumo específico de vapor	6,6	Kg/KW.H
Tolerância no consumo específico	3	%

Fonte: Martins (2019)

A turbina possui os seguintes sistemas Martins (2019):

- Sistema de óleo: Responsável pelo sistema de controle hidráulico e carga de óleo de resfriamento, incluindo um tanque de óleo separado, bomba principal e auxiliar, trocador de calor de óleo simples, filtro de óleo simples e filtro de óleo simples e tubulação de óleo.
- Sistema de vapor: Responsável por fornecer vapor para a turbina e sistemas auxiliares como: válvula de fechamento do eixo da turbina, válvula de escape.
- Sistema de vácuo e condensado: Responsável pelo sistema de exaustão da turbina e sistemas auxiliares incluindo condensador principal, condensador auxiliar, ejetores para vácuo do condensador principal e condensador de vapor extra.

## Condensador

Essas máquinas têm a função de condensar o vapor do estágio final da turbina, utilizando um líquido refrigerante (água) proveniente de uma torre de resfriamento, cujo equipamento será discutido a seguir. O condensador atual da usina é do tipo casco e tubo Figura 14, no qual o vapor condensado passa pelo casco e a água de resfriamento por dentro dos tubos (Martins, 2019).

Figura 14 - Condensador



Fonte: Martins (2019)



Tabela 4 - Dados nominais condensador

DESCRIÇÃO		UNIDADE
Pressão	0,12	BAR-A
Temperatura	50	°C
Vazão mássica	8000	Kg/h
Entalpia vapor	2459,75	KJ/Kg
Temp. água resfriamento	30	°C
Temp. saída água	40	°C
Carga térmica	4.000.000	Kcal/h
Vazão água resfriamento	430	m³/h

Fonte: Martins (2019)

### Torre de resfriamento

A torre de resfriamento faz parte de um sistema fechado de água de resfriamento que reduz a temperatura da água circulante e a integra ao circuito de resfriamento do condensador. Na UTE, é utilizada uma torre úmida de fluxo cruzado, Figura 15. Abaixo estão as informações da planta Tabela 5 (Martins, 2019).

Figura 15 - Torre de resfriamento



Fonte: Martins (2019)

Tabela 5 - Dados nominais torre de resfriamento

DESCRIÇÃO		UNIDADE
Carga térmica total	5.400.000	Kcal/h
Carga térmica p/cél	5.400.00	Kcal/h
Vazão total	500	m <sup>3</sup> /h
Vazão p/cél	500	m <sup>3</sup> /h
Temp. de água quente	40,8	°C
Temp. de água fria	30	°C
Temp. Bulbo úmido	26	°C
Altit. Rel. nível do mar	700	m
Pressão na entrada de água	2,8	mCA

Fonte: Martins (2019)

As bombas são usadas em várias partes do ciclo de geração de energia, possuindo o trabalho de bombear fluido de uma ponta a outra (Martins, 2019).

### Moega

A moega, Figura 16, é onde é colocado o combustível (casca de arroz) que chega na UTE, é obtido da empresa pelo processo de beneficiamento de arroz da matriz do Engenho Coradini e adquirido de outras empresas. Em seguida, é transportado por elevador até um silo e caixa para armazenamento (Martins, 2019).

Figura 16 - Moega



Fonte: Martins (2019)

## Silos de armazenagem

O combustível é armazenado no silo, Figura 17, onde o elevador o transporta para o silo de alimentação da caldeira. Quando um tanque está cheio, o combustível vai para outra caixa de armazenamento. O abastecimento aos silos, além do combustível da moega, é feito por meio de túneis. O combustível é produzido dentro da empresa (filial), a partir da colheita do arroz branco e parboilizado (Martins, 2019).

Figura 17 - Silo de armazenamento



Fonte: Martins (2019)

## Caixa de cinzas

Toda a cinza produzida pela queima do combustível vai para a caixa de armazenamento, Figura 18. Essa cinza é reaproveitada para restauração do solo (Martins, 2019).

Figura 18 - Caixa de cinzas



Fonte: Martins (2019)

### **Processo de geração de energia**

A unidade de cogeração do Engenho Coradini tem capacidade de geração de 1,2 MW, utilizando o ciclo térmico Rankine, tendo bombas, caldeiras, condensadores e turbinas como principais equipamentos para geração de energia elétrica. A unidade de cogeração em sua planta a vapor utiliza a água como fluido de trabalho e a biomassa da casca de arroz como combustível (Martins, 2019).

O processo de geração de energia ocorre inicialmente pela queima do combustível na caldeira, fornecendo calor latente e calor sensível ao fluido de trabalho, para transformá-lo em vapor nas condições de temperatura e pressão necessárias ao processo. Esse vapor é superaquecido, ou seja, tem temperatura mais alta e densidade menor que o vapor na pressão máxima da caldeira. O vapor superaquecido é usado para acionar a turbina. Ao passar pela tubulação, o vapor aumenta de velocidade, adquirindo a energia cinética necessária para movimentar a turbina, gerando assim o torque mecânico requerido pelo gerador (Martins, 2019).

O vapor passa pela turbina, vai de estágio em estágio, convertendo energia cinética em mecânica até chegar ao estágio final, já na forma de gás saturado. Este vapor saturado entra no condensador (trocador de calor - casco e tubo), encontra um feixe de tubos congelados. Nos tubos que formam o feixe, a água de resfriamento circula na torre de resfriamento, que faz parte do circuito. Quando o vapor encontra

os tubos de resfriamento, ele muda repentinamente seu estado físico de um estado saturado para um estado líquido condensado, criando uma pressão negativa nesta área, ou seja, um vácuo. Este depois de condensado retorna ao tanque condensador, onde é devolvido à caldeira, fechando assim o ciclo termodinâmico (Martins, 2019).

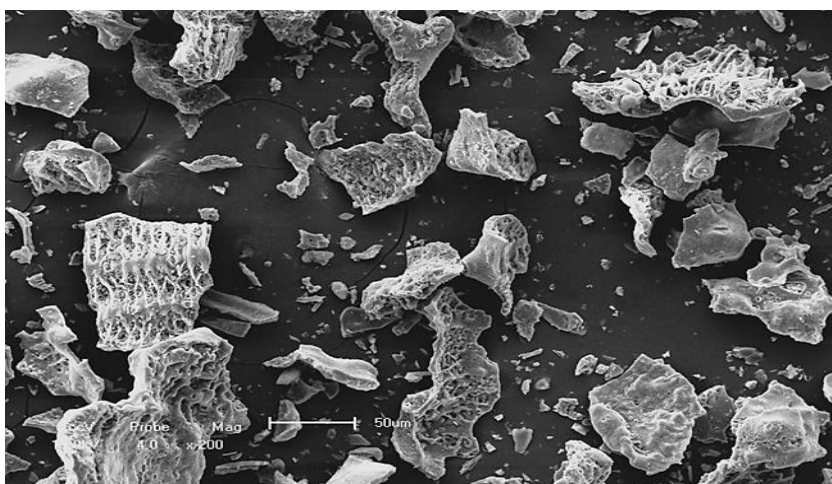
### **Caracterização das Cinzas**

A análise qualitativa por DRX mostrou que a cinza contém sílica amorfa, indicado pelo halo. A presença de sílica amorfa (pozolânica) ou cristalina (inerte) está diretamente ligada à temperatura e ao método de obtenção da cinza. Quando a temperatura de queima da CCA é baixa ou quando o tempo de exposição da mesma a altas temperaturas é pequeno, a sílica contida na cinza é predominantemente amorfa (POSSAMAI, 2001). Os picos foram comparados com padrões da literatura (Database RRUFF, 2022).

Por FRX demonstrou-se que o teor de sílica nas cinzas foi de 80,90% em massa; esse valor atende à NBR 12653 (ABNT, 2014) para apresentar atividade pozolânica.

A ondulação da epiderme externa, mostrada na micrografia de MEV na Figura 19, indica a presença de sílica, corroborando os resultados obtidos por DRX e FRX.

Figura 19 - Micrografia da CCA



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente monografia teve como viés a cogeração de energia e sua aplicação utilizando como combustível a casca de arroz. Para tal realizou-se uma revisão bibliográfica, na qual foram explorados recursos energéticos, matriz energética, transição de combustíveis não renováveis por renováveis (descarbonização), a fim de dar enfoque e justificativa para o uso de sistemas de cogeração a partir de casca de arroz no estado do Rio Grande do Sul.

O Rio Grande do Sul é o estado que mais produz arroz no Brasil, evidentemente produzirá mais biomassa residual de casca de arroz, oriunda do processo de beneficiamento, potencializando o recurso energético.

Assim proporcionado mais um recurso em nossa oferta energética, sendo um combustível renovável, e estando diretamente aliado a descarbonização e baixa na emissão de gases de efeito estufa, este possui enorme potencial para investimentos e exploração de novas tecnologias.

## REFERÊNCIAS

A FORÇA DA CASCA DE ARROZ: A FRONTEIRA OESTE TEM MAIOR USINA TERMELÉTRICA DO PAÍS QUE GERA ENERGIA A PARTIR DA QUEIMA DE CASCA DE ARROZ. Planeta Arroz. [S. l.], 15 jul. 2012. Disponível em: <https://planetaarroz.com.br/a-forca-da-casca-3/#>. Acesso em: 3 dez. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CARVÃO MINERAL (ABCM). **Carvão, Reservas, Mercado e Produção. Curso Carvão Mineral**. Curso promovido pela SATC- Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina em Criciúma/SC. Novembro de 2015.

ASSOCIAÇÃO DE REGULADORES DE ENERGIA DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA. ANP (Brasil). **Transição Energética no Brasil e as Ações da ANP**, RELOP, p. 1-28, 15 set. 2021. Disponível em: <https://www.erse.pt/en/communication/highlights-pt/relop-associacao-de-reguladores-de-energia-dos-paises-de-lingua-oficial-portuguesa-realizou-assembleia-geral-a-10-de-marco/>. Acesso em: 10 out. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653: Materiais pozolânicos** – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

**ATLAS**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao173/Energia%20Termel%C3%A9trica%20-%20Online%2013maio2016.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2022.

AZEVEDO, ROGÉRIO C.; ENSSLIN, LEONARDO. **Metodologia da pesquisa para engenharias**, [s. l.], p. 1-198, 18 out. 2020. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/rogerio-azevedo/publication/345778299\\_metodologia\\_da\\_pesquisa\\_para\\_engenharias/links/5fb3e5ca299bf10c3686ab20/metodologia-da-pesquisa-para-engenharias.pdf](https://www.researchgate.net/profile/rogerio-azevedo/publication/345778299_metodologia_da_pesquisa_para_engenharias/links/5fb3e5ca299bf10c3686ab20/metodologia-da-pesquisa-para-engenharias.pdf). Acesso em: 23 jan. 2023.

BALESTIERI, J. A. P. **Cogeração: geração combinada de eletricidade e calor**. Florianópolis: UFSC, 2002.

BARJA, G. J. A. **A Cogeração e sua Inserção ao Sistema Elétrico**. 2006. 171f. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, UnB, Brasília.

BARRETO, D; BONI, A. C.; ALVARENGA, R. P.; DE MIRANDA, R. B. Coleção UAB-UFSCar. **Planejamento e Gestão de Recursos Energéticos**, São Carlos, SP, Brasil, p. 1-247, 28 fev. 2013. Disponível em: [http://livresaber.sead.ufscar.br:8080/jspui/bitstream/123456789/2684/1/EA\\_DouglasBarreto\\_RecursosEnergeticos.pdf](http://livresaber.sead.ufscar.br:8080/jspui/bitstream/123456789/2684/1/EA_DouglasBarreto_RecursosEnergeticos.pdf). Acesso em: 12 jan. 2023.

BEGA, E. A. **Instrumentação aplicada ao controle de caldeiras**. 3.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

BELLOTE, A. F. J. **Energia limpa e acessível. Biomassa e sua participação na matriz energética brasileira**, Brasil, p. 1-11, 10 jul. 2019. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1103388/1/5008.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2022.

BEZERRA, F. D. B. **Caderno Setorial Etene Energia Solar**. Brasil, p. 1-15, 1 jul. 2021. Disponível em: [https://bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/834/1/2021\\_CDS\\_174.pdf](https://bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/834/1/2021_CDS_174.pdf). Acesso em: 28 dez. 2022.

BRASIL, N. P. **Notas de aula de Cogeração do Curso de Engenharia de Equipamentos**. 2005.

BRASIL. Ministério Minas de Energia. **Balço energético nacional 2022**, [S. l.], p. 1-264, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2023

BRASIL. Ministério Minas de Energia. **PNE 2050**. Secretária de planejamento e desenvolvimento energético, [s. l.], v. 1, 16 jul. 2020.

BRASIL. Ministério Minas de Energia. **Mudanças climáticas e Transição energética. In: Mudanças climáticas e Transição energética**. Empresa de Pesquisa Energética. [S. l.]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/clima-e-energia>. Acesso em: 12 out. 2022.

CARDOSO, B. M. **Uso da biomassa como alternativa energética**. 2012. 112f. Projeto de Graduação em Engenharia Elétrica, UFRJ, Rio de Janeiro.

CENBIO. **Atlas de Bioenergia do Brasil**. 2008. Convênio 007/2005 – MME. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/gbio/?q=livro/atlas-de-biomassa>. Acesso em: 13 setembro 2017.

CINTRA, Roberta. **Panorama e perspectivas das políticas públicas e normativas para a transição no contexto da Unasul**. Programa de pós-graduação em ciências ambientais, Universidade Federal de São Carlos, p. 1-326, 2018.

**COGERAÇÃO**. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA LUÍS DE QUEIROZ. Piracicaba, 2013, Brasil.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Arroz – Brasil: Série Histórica de Produção**. Disponível em: Acesso em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>, 20 de out 2022.

COP-21. **INFORMAÇÕES ÚTEIS**, [S. l.], p. 1-3, 23 fev. 2015.

COSTA, A. **A cogeração de energia e a sua inserção em indústrias arrozeiras utilizando a casca de arroz**. 2013. 101 f. Trabalho de conclusão de curso



(Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Regional do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2013. Disponível em:  
<https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/bitstream/handle/123456789/1813/TCC-%20Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 3 dez. 2022.

DA SILVA, J. V. **O impacto das energias renováveis na economia**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Economia) - Universidade do Sul de Santa Catarina, [S. l.], 2019. Disponível em:  
[https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/8008/1/JEFFERSON\\_VIANA\\_DA\\_SILVA%5B903-1-836559%5DJEFFERSON\\_VIANA\\_DA\\_SILVA.pdf](https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/8008/1/JEFFERSON_VIANA_DA_SILVA%5B903-1-836559%5DJEFFERSON_VIANA_DA_SILVA.pdf). Acesso em: 28 dez. 2022.

DA SILVA, J. **Caracterização Da Cinza Da Casca De Arroz Visando Aplicação Na Confeção De Materiais Alternativos Para Construção Civil**. Revista De Ciências Ambientais. Canoas, v. 14, ed. 1, 2020

DATABASE RRUFF. Disponível em: <<http://rruff.info/>>. Acesso em: 6/10/2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. ABCD Energia. In: **Matriz Energética e Elétrica**. 6 fev. 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 3 out. 2022.

EPE (Brasil). Ministério minas de energia. **Nota Técnica PR 04/18: Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050**. Recursos energéticos, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, p. 1-186, set. 2018.

**ESTES SÃO OS PAÍSES QUE MAIS AVANÇAM NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA**. Somos Ibero-América. 1. [S. l.], 7 abr. 2022. Disponível em:  
<https://www.somosiberoamerica.org/pt-br/temas/energia-pt-br/estes-sao-os-paises-ibero-americanos-que-mais-avancam-na-transicao-energetica/>. Acesso em: 28 dez. 2022.

FILHO, A. V. ESTUDOS E PESQUISAS Nº 444. **Hidroeletricidade e Outras Energias Renováveis: A Situação Brasileira no Contexto Internacional**, Brasil, p. 1-38, 20 out. 2012. Disponível em: <https://www.inae.org.br/wp-content/uploads/2015/04/EP0444.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2022.

GENOVESE, A. L.; UDAETA, M. E. M.; GALVÃO, L. C. R. **ASPECTOS ENERGÉTICOS DA BIOMASSA COMO RECURSO NO BRASIL E NO MUNDO**. ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, Campinas, v. 6, p. 1-10, 12 jan. 2023. Disponível em:  
[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022006000100021&script=sci\\_arttext](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022006000100021&script=sci_arttext). Acesso em: 12 jan. 2023.

HOFFMANN, R., JAHN, S. L., BAVARESCO, M., SARTORI, T. C. **APROVEITAMENTO DA CINZA PRODUZIDA NA COMBUSTÃO DA CASCA DE ARROZ: ESTADO DA ARTE**. 2010. Disponível em:<[http://www.ufsm.br/cenergia/arte\\_final.pdf](http://www.ufsm.br/cenergia/arte_final.pdf) >. Acesso em: 14 jan. 2023.

IEMA-INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (Brasil). **Série TERMOELETRICIDADE EM FOCO**. Geração termoelétrica e emissões atmosféricas: poluentes e sistemas de controle. São Paulo, ano 2016, v. 1, n. 1, p. 1-38, 1 dez. 2016. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/produto/geracao-termoeletrica-e-emissoes-atmosfericas-poluentes-e-sistemas-de-controle>. Acesso em: 12 jan. 2023.

LIMA, F. S. L. Potencial Uranífero no Brasil: uma revisão bibliográfica. **Brazilian Journal of Development**. Brasil, p. 1-16, 16 jun. 2021. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/31365>. Acesso em: 28 dez. 2022.

MAFFIOLETTI, J. Geração De Energia Elétrica Com Uso De Casca De Arroz. **Revista Brasileira de Energia**, [s. l.], v. 19, 2013.

MARTINS, Mitiâni Tavares Fábrica. **Relatório de estágio UTE engenho Coradini**. 2019. 43 f. Relatório de estágio Obrigatório (Bacharelado em Engenharia Energia) - Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2019. Disponível em: <https://drive.google.com/drive/folders/1arM8cMzOCLe03-2cK03fOidr0usV1-zG>. Acesso em: 19 dez. 2022.

MENEGAKI, A.N. On energy consumption and GDP studies; A meta-analysis of the last two decades. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p 31-36, 2014.

O RIO GRANDE DO SUL É O MAIOR PRODUTOR DE ARROZ EM CASCA DO BRASIL. **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul**. 2022. Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/arroz-saiba-mais>. Acesso em: 12 out. 2022.

OJEDA, Leonardo. Engenharias. **Caracterização da cinza de casca de arroz por drx, frx e mev**. 6º ENCONTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DO IFSUL CAMPUS BAGÉ, p. 1-6, 23 nov. 2022.

PARO, André de Carvalho. **Uma metodologia para gestão de eficiência energética em centrais de cogeração a biomassa: aplicação ao bagaço de cana**. 2011. 146 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

PIMENTEL, F. **O fim da era do petróleo e a mudança do paradigma energético mundial: perspectivas e desafios para a atuação diplomática brasileira**. FUNDAÇÃO ALEXANDRE GUSMÃO BRASÍLIA, 2011, v. 1, n. 1, p. 1-236, 22 fev. 2011. Disponível em: [https://funag.gov.br/biblioteca-nova/produto/1-305-fim\\_da\\_era\\_do\\_petroleo\\_e\\_a\\_mudanca\\_do\\_paradigma\\_energetico\\_mundial\\_perspectivas\\_e\\_desafios\\_para\\_a\\_atuacao\\_diplomatica\\_brasileira\\_o](https://funag.gov.br/biblioteca-nova/produto/1-305-fim_da_era_do_petroleo_e_a_mudanca_do_paradigma_energetico_mundial_perspectivas_e_desafios_para_a_atuacao_diplomatica_brasileira_o). Acesso em: 12 jan. 2023.

POSSAMAI DELLA, V. Caracterização De Cinza De Casca De Arroz Para Uso Como Matéria-Prima Na Fabricação De Refratários De Sílica. Quim. Nova, **Departamento de Engenharia Mecânica/Departamento de Ciência e Engenharia**

**de Materiais**, Universidade Federal de Santa Catarina, CP 476, 88040-900 Florianópolis - SC, v. 24, ed. 6, 2001.

PRETZ, Ricardo. **Potencial bioenergetico do setor arrozeiro do Rio Grande do Sul: uma abordagem termelétrica**. Tese de Doutorado, PROMEC / UFRGS, Porto Alegre: 2001.

R. LOPESA, Emanoelli. **Caracterização Elementar Da Casca De Arroz E Suas Cinzas Por Mip Oes Após Decomposição Ácida Com Sistema De Refluxo**. Quim. Nova, Vol. 40, No. 9, p. 1009-1017, 2017.

SANTOS, Fernando Butierres; NOVO, Luciana Morgani Alves. **Fundamentos teóricos relacionados à cogeração e o exemplo da central de cogeração Infoglobo**. 2008. 189 f. Projeto de Graduação em Engenharia Elétrica – UFRJ, Rio de Janeiro.

SANTOS, F. M. Transição energética: enquadramento e desafios. Universidade Federal da Grande Dourados. **Revista Videre**, ano 2019, v. 11, n. 22, p. 143-153, 5 fev. 2019. DOI 10.30612/videre. V11i22.11217. Disponível em: <http://ojs.ufgd.edu.br/index.php/videre/article/view/11217>. Acesso em: 12 jan. 2023.

SILVA, Rosiane Cristina. **Energia renovável: uso da Cogeração Baseada em Biomassa da Casca de Arroz como Elemento Alternativo para a Indústria Manufatureira Brasileira**. 2017. 41 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - **Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.**, [S. l.], 2017. Disponível em: <http://repositorio.unitau.br/jspui/bitstream/20.500.11874/5449/1/Rosiane%20C.%20da%20Silva%20e%20Tais%20A.%20R.%20da%20Rocha.pdf>. Acesso em: 2 jan. 2023.

TOLMASQUIM, Mauricio T. **Matriz energética brasileira**. Uma prospectiva, [S. l.], p. 1-26, 1 nov. 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/nec/a/HHYKXDgchzv4n4gNfRhqnwK/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 28 dez. 2022.

TOLMASQUIN, M. T. **Energia termelétrica, gás natural, biomassa carvão, nuclear**. 1. ed. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016.

## ANEXO A- ARTIGO COMPLETO

### CARACTERIZAÇÃO DA CINZA DE CASCA DE ARROZ POR DRX, FRX, E MEV

OJEDA, L. V.<sup>1</sup>, OLIVEIRA, C, V.<sup>2</sup>, Daniele, sabrina

<sup>1</sup> UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA (UNIPAMPA) – Bagé – RS – Brasil –  
leonardoojeda.aluno@unipampa.edu.br

<sup>2</sup> UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA (UNIPAMPA) – Bagé – RS – Brasil –  
vanessaoliveira.aluno@unipampa.edu.br

### RESUMO

Sendo um dos maiores produtores de arroz o Brasil possui uma de safra de 11,618 milhões de toneladas por ano, deste total 20% são de casca de arroz, sendo um subproduto abundante, métodos eficientes de descarte se fazem necessários para a destinação correta desse resíduo. Através da combustão deste subproduto, durante a geração de energia térmica, uma grande quantidade de cinzas é gerada como resíduo. Geralmente, as cinzas de casca de arroz (CCA) apresentam características pozolânicas, podendo ser utilizadas na indústria cimenteira e na agricultura, por conta dos minerais presentes na sua composição. Contudo, uma caracterização preliminar é importante para dar destino adequado ao resíduo. Neste analisou-se a morfologia, a composição mineral e a elemental de uma CCA, respectivamente, por microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios-X (DRX) e fluorescência de raios-X (FRX). Foi demonstrado que, a CCA caracteriza-se por um material poroso, mineralogicamente a CCA contém sílica (SiO<sub>2</sub>) predominantemente amorfa e alto teor de silício (Si). Dessa forma é um material adequado para uso como pozolana.

Palavras-chave: cinza de casca de arroz, caracterização, MEV, DRX, FRX.

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo o atlas socioeconômico do Rio Grande do Sul nas Américas, o Brasil é o maior produtor de arroz, com 10,3 milhões, seguido dos Estados Unidos com 10,3 milhões de toneladas. Entre as unidades da federação, o Rio Grande do Sul é o maior produtor de arroz em casca do Brasil. Segundo a Pesquisa Agrícola Municipal do IBGE, o RS registrou no período 2018-2020 uma produção de 7.775.850 toneladas em média do grão<sup>1</sup>.

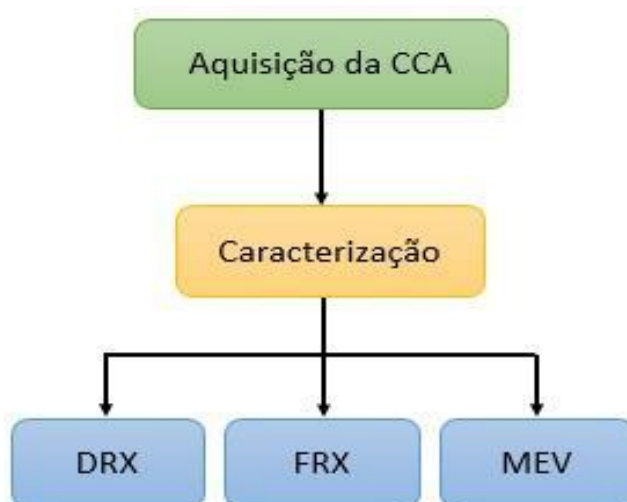
A queima de casca de arroz para produção de energia é uma opção atrativa do ponto de vista econômico e tecnológico. Além do baixo impacto ambiental, todo o CO<sub>2</sub> gerado durante a combustão retorna ao ciclo do carbono da biosfera terrestre<sup>3</sup>.

A caracterização micro estrutural de um material envolve a determinação de propriedades como estrutura cristalina, composição química, tamanho de partícula, para se ter uma ideia do comportamento que garante a qualidade do material. Nesse contexto, o desenvolvimento de tecnologias de reaproveitamento decorre do pleno conhecimento desses resíduos, permitindo sua caracterização para determinar suas propriedades e, então, incorporá-los nos mais diversos materiais alternativos<sup>2</sup>.

## 2 METODOLOGIA (MATERIAL E MÉTODOS)

A metodologia empregada, está disposta na figura 1.

**Figura1:** Metodologia.



## 2.1 Material

Foram analisadas as CCA geradas no processo de cogeração da cerealista CORADINI, localizada na Região da Campanha Gaúcha, na cidade de Bagé-RS, a empresa trabalha com beneficiamento de arroz, conforme mostra a figura 1.

**Figura 2:** CAA.



## 2.2 Método

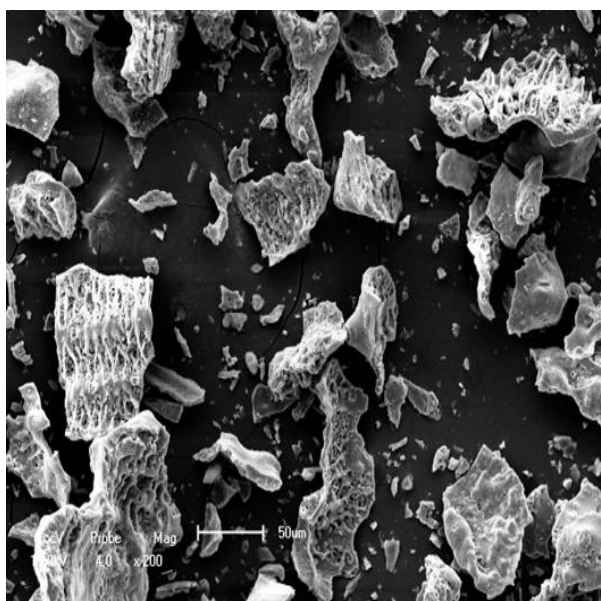
A aquisição das imagens por MEV foi realizada em um equipamento da marca SSX 500, Superscan – Shimadzu com tensão de 15 kV e detecção de imagens de elétrons secundários, acoplado a um analisador de espectroscopia de energia dispersiva (EDS), realizados em pelotas. A caracterização microestrutural foi realizada por meio de DRX no Laboratório de raios-X (LRX) da UNIPAMPA em equipamento Rigaku modelo ULTIMA IV com geometria Bragg-Brentano nas condições operacionais: 40 kV/20 mA, radiação linha k- $\alpha$  do cobre e passo de 0,05°/s. As análises químicas foram realizadas por meio do FRX equipamento de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X, marca Bruker, modelo S1 Turbo SD LE, no LATRAM - Laboratório de Lavra e Tratamento de Minérios da Universidade Federal do Pampa, campus Caçapava do Sul.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### MEV

A Figura 2 mostra as micrografias de MEV das cinzas analisadas. Claramente observam-se diferenças quanto à morfologia e microestrutura do material. A caracterização microestrutural da cinza, (Figura 2), mostrou a presença de partículas grandes (~1 mm) e pequenas (< 0,5 mm), predominando as menores e apresenta as epidermes internas e externas das CCA. Nota-se que a mesma apresenta uma estrutura celular e porosa resultante da remoção de lignina e celulose presentes na casca durante a queima, uma vez que a celulose é o maior constituinte orgânico da casca<sup>5</sup>.

Figura 2– Composição química da cinza de casca de arroz

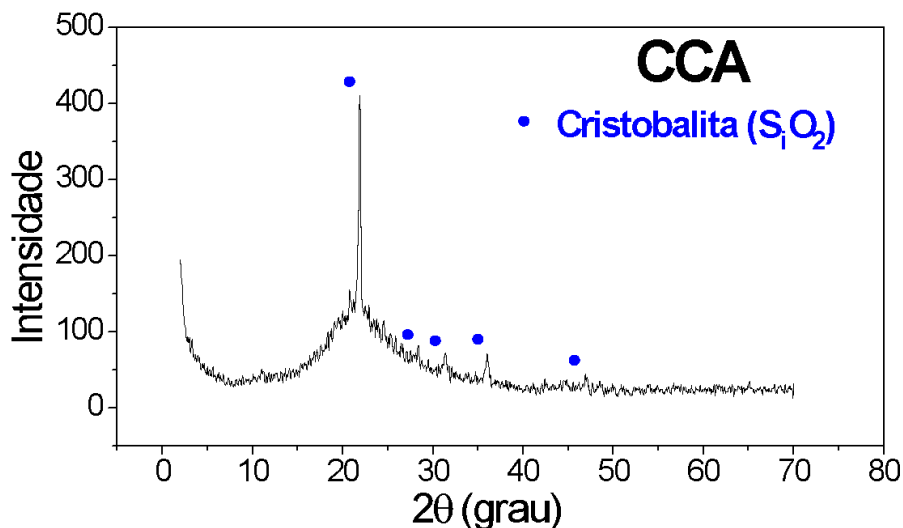


#### DRX

Análise mineralógica mostrou que a cinza apresenta sílica na forma amorfa (Figura 1). A presença de sílica amorfa (reativa) ou cristalina (praticamente inerte) está diretamente ligada à temperatura e ao método de obtenção da cinza. Quando a temperatura de queima da CCA é baixa ou quando o tempo de exposição da mesma

a altas temperaturas é pequeno, a sílica contida na cinza é predominantemente amorfa.

Figura 3– Composição química da cinza de casca de arroz



## FRX

A composição química (em massa) da cinza de casca de arroz está representada na Tabela 1. Os resultados mostram que a amostra utilizada atende à NBR 12653 (ABNT, 2014) para apresentar atividade pozolânica. De acordo com a norma, a soma das quantidades de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, e Fe<sub>3</sub>O<sub>3</sub> deve ser superior a 70%, bem como a quantidade de SO<sub>3</sub> deve ser inferior a 5%. A Tabela 1 mostra que os valores para a primeira exigência superam 70% e inferior a 0,5% no segundo caso.

Tabela 1 – Composição química da cinza de casca de arroz

CCA	
Elementos	%
SiO <sub>2</sub>	80,90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,88
SO <sub>3</sub>	0,08



Esta análise química revelou um percentual de SiO<sub>2</sub> de 80,90%, tendo como principais impurezas (em quantidades inferiores a 1%) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e SO<sub>3</sub>.

#### **4 CONCLUSÃO**

Uma das maiores potencialidades do uso da cinza de casca de arroz é a adição ao concreto, melhorando o desempenho mecânico e aumentam a durabilidade em ambientes agressivos, além de vantagens econômicas e ambientais. De acordo com os resultados, é mostrado que a CCA tem na sua composição química predominantemente sílica, e é amorfa, com poucos picos cristalino de cristobalita, conforme DRX. As Cinzas são porosas, estes resultados mostram que o amorfismo e sua porosidade.

## REFERÊNCIAS

1. <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/arroz> saiba-mais, acessada em novembro 2016.
2. DA SILVA, Juliana. **Caracterização Da Cinza Da Casca De Arroz Visando Aplicação Na Confeção De Materiais Alternativos Para Construção Civil**. Revista De Ciências Ambientais, Canoas, v. 14, ed. 1, 2020
3. R. LOPESA, Emanoelli. **Caracterização Elementar Da Casca De Arroz E Suas Cinzas Por Mip Oes Após Decomposição Ácida Com Sistema De Refluxo**. Quim. Nova, Vol. 40, No. 9, p. 1009-1017, 2017.
4. Database RRUFF. Disponível em: <<http://rruff.info/>>. Acesso em: 6/10/2022.
5. POSSAMAI DELLA, Viviana . **Caracterização De Cinza De Casca De Arroz Para Uso Como Matéria-Prima Na Fabricação De Refratários De Sílica**. Quim. Nova, Departamento de Engenharia Mecânica/Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, CP 476, 88040-900 Florianópolis - SC, v. 24, ed. 6, 2001.